



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JOONA PULKKINEN  
BETONISEN PALKIN PURISTUSMURTOKESTÄVYYS YHDISTE-  
TYILLÄ RASITUKSILLA  
Diplomityö

Tarkastaja: professori Anssi Laaksonen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Talouden ja rakentamisen tiedekunta-  
neuvoston kokouksessa 29. toukokuuta  
2017

## TIIVISTELMÄ

**JOONA PULKKINEN:** Betonisen palkin puristusmurtokestävyys yhdistetyillä rasituksilla

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 84 sivua, 9 liitesivua

Kesäkuu 2017

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Anssi Laaksonen

**Avainsanat:** puristusmurto, yhdistetyt rasitukset, tasojännitystila, laattapalkki, silta

Jännitetyillä palkkisilloilla betonin puristusmurto yhdistetyillä rasituksilla on yleensä poikkileikkauksen koon mitoittava tekijä. Palkin puristusmurto voi tapahtua palkin puristuspinnassa eli taivutusmomentin ja jännevoiman vaikutuksesta poikkileikkauksen puristetummalla puolella taivutus- ja vääntömomentin yhteisvaikutuksen seurauksena sekä palkin sivupinnassa leikkausvoiman ja vääntömomentin yhteisvaikutuksen seurauksena. Tutkimuksen tarkoituksena oli saada lisää tietoa puristusmurtokestävyydestä ja siihen liittyvistä tekijöistä.

Tässä työssä tutkittiin poikkileikkauksen puristus- ja sivupinnan puristusmurtokestävyyttä yhdistetyillä rasituksilla tasojännitystilojen avulla. Tutkimus suoritettiin case-tutkimuksena. Laskennassa sivupinta otaksuttiin halkeilleeksi. Puristuspinna laskettiin sekä halkeilleena että halkeilemattomana. Tasojännitystilojen mukaisen laskennan tuloksia verrattiin puristuspinnassa NCCI 2:n mukaisiin tuloksiin ja sivupinnassa NCCI 2:n ja EN 1992-2:n mukaisiin tuloksiin.

Suurimmassa osassa tarkasteltavia poikkileikkauksia sivupinnan ensisijainen murtotapa oli tasojännitystilojen mukaisesti laskettuna raudituksen murto. Osassa tarkasteltavia poikkileikkauksia sivupinnan rauditus ei kestänyt tarkastelumallin mukaan mitoitusrasituksia. Tasojännitystilojen mukaisella tarkastelulla palkin sivupinnan puristusmurtokestävyys on tarkasteltavissa poikkileikkauksissa pienempi kuin NCCI 2:n tai EN 1992-2:n mukainen puristusmurtokestävyys, mikä johtuu osin suhteellisen pienestä sivupinnan rauditusmäärästä.

Puristuspinna kesti kaikissa tarkasteltavissa poikkileikkauksissa mitoitusrasituksilla tasojännitystilojen mukaisella laskennalla. Tarkasteltavissa poikkileikkauksissa tasojännitystilojen mukaisessa laskennassa puristuspinnan puristusmurtokestävyys oli suurempi kuin NCCI 2:n mukainen puristusmurtokestävyys, kun NCCI 2:n mukainen vääntökestävyys ylärajan käyttöaste oli suurempi kuin noin 0,33. Vastaavasti puristusmurtokestävyys oli pienempi tasojännitystilojen mukaisessa mitoituksessa, jos vääntökestävyys ylärajan käyttöaste oli pienempi kuin noin 0,33.

Taivutuksen ja väännön yhteisvaikutuksesta tapahtuva puristusmurto osoittautui tekijäksi, joka tulisi ottaa huomioon poikkileikkauksissa, joissa esiintyy suuria vääntömomentteja suhteessa poikkileikkauksen kokoon. Yhteisvaikutuksesta tapahtuva puristusmurto ei kuitenkaan tämän tutkimuksen mukaan määrää poikkileikkauksen kokoa niin paljon kuin nykyinen NCCI 2:n mukainen yhteisvaikutusehto.

## ABSTRACT

**JOONA PULKKINEN:** Crushing capacity of concrete beam under combined actions

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 84 pages, 9 Appendix pages

June 2017

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Design

Examiner: Professor Anssi Laaksonen

**Keywords:** concrete crushing, combined actions, plane stress, T-beam, bridge

For post-tensioned beam bridges, concrete crushing with combined actions usually determines the size of the cross-section. As a result of combined bending and torsion, crushing can occur at the compression surface, which is the most compressed surface of the beam due to bending. As a result of combined shear and torsion, crushing can occur at the side surface of the beam where the shear stresses caused by shear and torsion are codirectional. The goal of this study was to find out more about concrete crushing resistance and about issues that are related to that.

In this study, T-beam's compression and side surfaces' crushing resistances with combined actions were studied with a plane stress approach. The study was conducted in the form of a case study. The side surface was assumed to be cracked. The compression surface was calculated both as cracked and as uncracked surface. The results from the compression surface were compared to the Finnish bridge design guide called "NCCI 2", which fulfils the standards set by Eurocode 2. The results from the side surface were compared to both NCCI 2 and EN 1992-2.

In most of the studied cross-sections, the primary failure of the side surface was the failure of reinforcement. In some of the studied cross-sections, the reinforcement of the side surface did not withstand the dimensioning stresses. According to the results, the crushing capacity of the side surface proved to be smaller than that of found in NCCI 2 or EN 1992-2, partly due to relatively small amount of reinforcement in the side surface.

In the compression surface, the reinforcement withstood the dimensioning stresses in all studied cross-sections. In all of these cases, the crushing capacity of the compression surface was also greater than the one found in NCCI 2 when the NCCI 2-based torsional concrete crushing capacity utilization rate was greater than approximately 0.33. Correspondingly, the crushing capacity was lower if the torsional crushing capacity utilization rate was less than approximately 0.33.

Concrete crushing under combined bending and torsion should be considered in cross-sections that are under high torsional stresses. However, according to this study, concrete crushing under combined bending and torsion is not as determining factor in the size of the cross-section as that of found in NCCI 2.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Liikenneviraston tilauksesta A-Insinöörit Suunnittelu Oy:ssä silta- ja taitorakenteiden yksikössä vuonna 2017.

Haluan esittää suuret kiitokset Anssi Laaksooselle mielenkiintoisesta ja haastavasta diplomityön aiheesta sekä työn ohjauksesta ja tarkastamisesta. Työn ohjausryhmään kuuluivat Liikennevirastosta Heikki Lilja ja Timo Tirkkonen, joille haluan myös esittää suuret kiitokset työn ohjauksesta. Lisäksi haluan kiittää Liikennevirastoa ja A-Insinöörit Suunnittelu Oy:tä diplomityöni rahoittamisesta. Suuret kiitokset kuuluvat myös A-Insinöörien kollegoille, jotka ovat osallistuneet tavalla tai toisella tähän diplomityöhön.

Iso kiitos kaikille opiskelukavereilleni ja ystävilleni hauskoista, mielekkäistä ja muistokkaista opiskeluvuosista. Lopuksi haluan erityisesti kiittää perhettäni sekä avopuolisoani Pipsaa tuesta ja kannustuksesta opintojeni aikana.

Tampereella, 23.5.2017

Joona Pulkkinen



# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Tutkimuksen tausta .....	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet .....	1
1.3	Tutkimuksen rajaukset ja suoritus .....	2
1.4	Standardien, normien ja ohjeiden keskinäinen asema siltasuunnittelussa .....	2
2.	RISTIKKOANALOGIAN MUKAINEN MITOITUS .....	4
2.1	Materiaaliominaisuudet .....	4
2.1.1	Betoni .....	4
2.1.2	Betoniteräs .....	7
2.1.3	Jänneteräs .....	7
2.2	Puristusmurto .....	8
2.3	Puristumurtokestävyys yhdistetyillä rasituksilla EN 1992-2 mukaan .....	9
2.4	Puristumurtokestävyys yhdistetyillä rasituksilla NCCI 2 mukaan .....	11
2.5	Mitoitustapojen erot ja niiden vaikutukset .....	12
3.	TASOJÄNNITYSTILAN MUKAINEN MITOITUS .....	15
3.1	Tasojännitystilän määrittäminen .....	16
3.1.1	Leikkaus .....	16
3.1.2	Vääntö .....	18
3.1.3	Taivutus ja puristus .....	20
3.1.4	Jännitystilojen yhdistäminen ja tarkasteltavat alueet .....	21
3.1.5	Puristumurtokestävyyden arviointi .....	23
3.2	Halkeilematon homogeeninen tasojännityselementti .....	24
3.3	Halkeillut teräsbetoninen tasojännityselementti .....	25
3.4	Betonin puristuskestävyys tasojännitystilassa .....	28
3.4.1	Puristuskestävyyden laskenta EN 1992-2 mukaan .....	29
3.4.2	Puristuskestävyyden laskenta kohtisuoran venymän mukaan .....	31
3.4.3	Puristuskestävyyksien vertailua .....	32
4.	LAATTAPALKIN PURISTUMURTOKESTÄVYYDEN TARKASTELU .....	34
4.1	Tasojännitystilän mukaisen laskennan periaatteet ja otaksumat .....	34
4.1.1	Rasituksista aiheutuvat tasojännitystilat .....	35
4.1.2	Tasojännitystilojen tarkastelu .....	36
4.1.3	Puristumurtokestävyyden laskenta .....	37
4.1.4	Laskennan erot standardiin EN 1992-2 verrattuna .....	39
4.2	Tarkasteltavat poikkileikkaukset .....	39
4.2.1	Västersundomin risteysilta C .....	40
4.2.2	Tärttämäen silta .....	43
4.2.3	Poikkileikkausten raudoitus .....	48
5.	TARKASTELUN TULOKSET .....	50
5.1	Västersundomin risteysilta C .....	50
5.1.1	Puristuspinta .....	50

5.1.2	Sivupinta .....	57
5.2	Tärttämäen silta .....	61
5.2.1	Puristuspinta .....	61
5.2.2	Sivupinta .....	68
5.3	Siltojen yhdistetyt tulokset .....	73
6.	YHTEENVETO .....	78
6.1	Tulokset ja päätelmät .....	78
6.2	Jatkotutkimustarpeet .....	80
	LÄHTEET .....	82

LIITE A: Västersundomin risteyssillan C tarkasteltavien poikkileikkausten tiedot

LIITE B: Tärttämäen sillan tarkasteltavien poikkileikkausten tiedot

LIITE C: Esimerkki tasojännitystilojen mukaisesta laskennasta

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

### Merkinnät

ACI	American Concrete Institute
CEB	Comité euro-international du béton / European Committee for Concrete
EN 1992-2	SFS-EN 1992-2 + AC + kansallinen liite
<i>fib</i>	Fédération internationale du béton / International Federation for Structural Concrete
FIP	Fédération Internationale de la Précontrainte / International Federation for Prestressing
ka	käyttöaste
NCCI 2	Liikenneviraston eurokoodin soveltamisohje betonirakenteiden suunnitteluun

### Latinalaiset kirjaimet

$A_k$	tehollisen kotelopoikkileikkauksen seinämien keskiviivojen rajaama pinta-ala
$A_p$	punoksen tai jänteen nimellispoikkipinta-ala
$A_s$	betoniterästen pinta-ala
$b$	suorakaidepoikkileikkauksen leveys
$b_w$	palkin uuman pienin leveys eurokoodin mukaan ja palkin uuman leveys laipan alapinnan korkeudella NCCI 2:n mukaan
$b_{eff}$	laatan toimiva leveys
$d$	palkin tehollinen korkeus
$D_n$	punoksen nimellishalkaisija
$E_p$	jänneteräksen kimmokerroin
$E_s$	betoniteräksen kimmokerroin
$f_{cd}$	betonin puristuslujuuden mitoitusarvo
$f_{ck}$	betonin lieriölujuus 28 vuorokauden ikäisenä
$f_{ctd}$	betonin vetolujuuden mitoitusarvo
$f_{p0,1k}$	jänneteräksen jännitys, joka aiheuttaa 0,1 %:n pysyvän venymän
$f_{pd}$	jänneteräksen vetolujuuden mitoitusarvo
$f_{pk}$	jänneteräksen vetolujuuden ominaisarvo
$f_{yd}$	betoniteräksen myötölujuuden mitoitusarvo
$f_{yk}$	betoniteräksen myötölujuuden ominaisarvo
$h$	poikkileikkauksen korkeus
$h_l$	laatan korkeus
$I$	jäyhyysmomentti
$k_{V,c}$	betonin leikkauskapasiteetti suhteessa kokonaisleikkauskapasiteettiin
$M_{Ed}$	taivutusmomentin mitoitusarvo
$M_{pl,Rd,max}$	taivutuskestävyys tasapainoraidoitettuna
$M_{Rd}$	taivutuskestävyys
$n$	betonin jännitys-muodonmuutosyhteyteen liittyvä eksponentti
$P_d$	kokonaisjännevoiman mitoitusarvo

$R$	amplitudi
$S$	staattinen momentti
$T_{Ed}$	vääntömomentin mitoitusarvo
$T_{Rd}$	vääntökestävyys
$T_{Rd,max}$	vääntökestävyyden yläraja
$t_{ef}$	tehollisen kotelopoikkileikkauksen seinämän paksuus
$u$	palkin ulkopinnan piiri
$V_{Ed}$	leikkausvoiman mitoitusarvo
$V_{Rd,max}$	leikkauskestävyyden yläraja
$W_{tr}$	tehollisen kotelopoikkileikkauksen vääntövastus
$z$	palkin taivutuksen sisäinen momenttivarsi
$z_p$	jänneterästen sisäinen momenttivarsi tai jänneterästen painopisteen etäisyys palkin alapinnasta (liite A ja B)
$z_s$	betoniterästen sisäinen momenttivarsi

### Kreikkalaiset kirjaimet

$\alpha$	pääjännityksien suhde
$\alpha_{cc}$	kerroin, jolla huomioidaan betonin puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikaistekijät
$\alpha_{cw}$	kerroin, jolla huomioidaan poikkileikkauksen puristusjännitystilan vaikutukset
$\alpha_e$	korkeuden ja leveyden suhteen huomioiva kerroin
$\gamma_c$	betonin osavarmuusluku
$\gamma_p$	jänneteräksen osavarmuusluku
$\gamma_s$	betoniteräksen osavarmuusluku
$\varepsilon_c$	betonin puristuma
$\varepsilon_{c2}$	betonin puristuma murtolujuuden saavuttamiskohdassa
$\varepsilon_{cu2}$	betonin murtopuristuma
$\varepsilon_{ud}$	betoni- tai jänneteräksen muodonmuutoksen yläraja-arvo
$\varepsilon_x$	x-suunnan venymä
$\varepsilon_y$	y-suunnan venymä
$\varepsilon_1$	suurin päävenymä
$\varepsilon_2$	pienin päävenymä
$\eta_{fc}$	betonin lujuuden huomioiva kerroin
$\eta_\varepsilon$	betonin poikkisuuntaisen venymän huomioiva kerroin
$\theta$	pääpuristusjännityksen suuntakulma rakenteen pituussuuntaisen akselin suhteen
$\theta_1$	suurimman pääjännityksen suuntakulma rakenteen pituussuuntaisen akselin suhteen
$\theta_2$	pienimmän pääjännityksen suuntakulma rakenteen pituussuuntaisen akselin suhteen
$\theta_{el}$	kimboteorian mukainen pääpuristusjännityksen suuntakulma pituussuuntaisen akselin suhteen
$\theta_{pl}$	pääpuristusjännityksen suuntakulma halkeilleessa tilassa rakenteen pituussuuntaisen akselin suhteen
$\nu$	betonin puristuslujuuden pienennyskerroin
$\nu_1$	betonin puristuslujuuden pienennyskerroin eurokoodin mukaan
$\rho_x$	x-suunnan geometrinen raudoitussuhde

$\rho_y$	y-suunnan geometrinen raudoitussuhde
$\sigma_1$	suurin pääjännitys
$\sigma_2$	pienin pääjännitys
$\sigma_3$	3. suunnan pääjännitys
$\sigma_{c1}$	betonin suurin pääjännitys
$\sigma_{c2}$	betonin pienin pääjännitys
$\sigma_{cd}$	betonin puristusjännityksen mitoitusarvo
$\sigma_{cd,max}$	betonin puristuskestävyyden mitoitusarvo
$\sigma_{ck}$	betonin puristusjännityksen ominaisarvo
$\sigma_{cp}$	betonin keskimääräinen jännitys rakenteen pituussuunnassa
$\sigma_k$	normaalijännitysten keskiarvo
$\sigma_{sx}$	x-akselin suuntaisen raudoituksen normaalijännitys
$\sigma_{sy}$	y-akselin suuntaisen raudoituksen normaalijännitys
$\sigma_x$	x-akselin suuntainen normaalijännitys
$\sigma_y$	y-akselin suuntainen normaalijännitys
$\sigma_z$	z-akselin suuntainen normaalijännitys
$\tau_c$	betonin leikkausjännitys
$\tau_{c12}$	betonin leikkausjännitys halkeaman suunnassa
$\tau_{xy}$	leikkausjännitys x- ja y- koordinaattiakselien tasossa
$\tau_{cxy}$	betonin leikkausjännitys x- ja y- koordinaattiakselien tasossa

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Jännitetyillä palkkisilloilla poikkileikkauksen koon määräävänä tekijänä on yleensä betonin puristusmurtokestävyys yhdistetyillä rasituksilla [1–3]. Liikenneviraston eurokoodin soveltamisohjeessa betonirakenteiden suunnitteluun (NCCI 2) yhdistettyjen rasitusten yhteisvaikutus tarkastetaan taivutus- ja vääntörasituksen osalta sekä vääntö- ja leikkausrasituksen osalta [4, s. 60]. Taivutuksen ja väännön yhteisvaikutuksella tarkastetaan, että betonin puristumurtoa ei tapahdu taivutuksen vaikutuksesta palkin puristetussa pinnassa. Jatkuva rakenteessa taivutus- ja vääntörasituksen yhteisvaikutus tulee yleisimmin määrääväksi tekijäksi välitukialueilla. Leikkaus- ja vääntörasituksen yhteisvaikutuksella tarkistetaan, että betonin puristumurtoa ei tapahdu palkin sivupinnassa, jossa väännön ja leikkauksen aiheuttamat jännitykset ovat samansuuntaiset. Se saattaa tulla määrääväksi tekijäksi maa- ja välitukialueilla.

Suomessa oli vuoden 2016 alussa 15140 Liikenneviraston hallinnoimaa tiesiltaa. Näistä silloista betonisia yksiaukkoisia tai jatkuvia palkkisilloja oli 1269 kappaletta (n. 8%). Palkkisilloista jännitetyjä siltoja oli 934 kappaletta (n. 74 %). Siltojen kokonaispinta-alan mukaan tarkasteltuna pelkästään jännitetyjä betonisia jatkuvia palkkisilloja (jBjp) oli kaikista silloista noin 13 %, joka edustaa huomattavaa osuutta Suomen silloista. [5, s. 25–28]

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen ensisijaisena tavoitteena on saada lisää tietoa puristusmurtokestävyydestä ja siihen liittyvistä asioista yhdistetyillä rasituksilla. Toissijaisena tavoitteena on arvioida tutkimuksen avulla nykyisen NCCI 2:n mukaisen menettelyn soveltuvuutta ja mahdollisia epäkohtia.

Tutkimusongelma voidaan esittää kysymyksellä ”miten tasojännitystilojen mukainen puristusmurtokestävyys poikkeaa nykyisen menettelytavan mukaisesta puristusmurtokestävyydestä?”. Tutkimusongelmaan liittyviä aliongelmia ovat muun muassa ”miten eri rasituksista aiheutuvat jännitykset jakaantuvat poikkileikkauksessa?”, ”miten halkeilu vaikuttaa jännityksiin?” ja ”millä tavalla raudoituksen määrä vaikuttaa puristusmurtokestävyyteen?”.

### 1.3 Tutkimuksen rajaukset ja suoritus

Tutkimus suoritetaan tapaustutkimuksena. Tutkimus rajataan koskemaan vain siltojen jännitettyjä laattapalkkipoikkileikkauksia. Tutkimuksessa tarkastellaan kahden eri sillan poikkileikkauksia. Siltakohteina on yksi- ja kolmipalkkinen silta, joista molemmat ovat jännitettyjä. Siltakohteista varsinkin yksipalkkinen silta edustaa tyypillistä risteyssiltaa, joissa on yleensä suhteellisen leveä ja matala palkki.

Tutkimusmenetelminä on kirjallisuuskatsaus ja laskennallinen tarkastelu käsinlaskennalla. Työn teoriaosuudessa esitetään betonin ja betoniteräksen tärkeimmät ominaisuudet. Siinä esitetään myös nykyinen puristusmurron mitoituskäytäntö yhdistetyille rasiuksille sekä NCCI 2:n että EN 1992-2:n (SFS-EN 1992-2 + AC + kansallinen liite) mukaan. Lisäksi teoriaosuudessa esitetään tasojännitystilän yleistä teoriaa ja pyritään löytämään kirjallisuudesta valmiita ratkaisumalleja tutkimusongelman ratkaisemiseksi.

Laskennallinen tarkastelu suoritetaan kohteista valituilla poikkileikkauksilla ja tarkastelu tehdään tasojännitystilojen avulla. Poikkileikkaukset pyritään valitsemaan niin, että puristumurtokestävyys on ollut niissä määrävänä tekijänä. Toisaalta tarkasteltavia poikkileikkauksia pyritään valitsemaan niin, että poikkileikkaukset eroaisivat toisistaan merkittävästi esimerkiksi dimensioiltaan tai rasiuksien keskinäisistä suhteistaan. Tarkastelussa tasojännitystilän mukaisesti laskettuja poikkileikkausten puristumurtokestävyysä vertaillaan nykyisen mitoituksen mukaisiin puristumurtokestävyysä.

Laskennallisessa tarkastelussa ei huomioida tukireaktion ja tukialueen vaikutusta poikkileikkauksen kestävyysä. Myös palkin nurkka-alueiden vaikutus rajataan työn ulkopuolelle.

### 1.4 Standardien, normien ja ohjeiden keskinäinen asema silta-suunnittelussa

Eurokoodit ovat kantavien rakenteiden suunnittelustandardeja, joita käytetään yhdessä kansallisten liitteiden kanssa. EN 1992-2 on betonisiltojen mitoituksessa ja suunnittelussa käytettävä eurokoodi. Eurokoodien mukaan suunniteltujen ja toteutettujen kantavien rakenteiden teknisten vaatimusten katsotaan täyttyvän ympäristöministeriön asetuksen [6] mukaan eikä rakenteiden teknisten vaatimusten täyttymistä tarvitse osoittaa rakennusviranomaiselle, kuten muuta suunnittelujärjestelmää käytettäessä.

Eurokoodi 2 perustuu pitkälti betonirakenteiden mallinormeihin (engl. Model Code), etenkin vuoden 1990 mallinormiin [7, s. 1]. Mallinormeja laatii kansainvälinen betonirakenteiden asiantuntijaorganisaatio *fib* (Fédération internationale du béton), joka ennen vuotta 1998 oli kahden järjestön yhteenliittymä CEB-FIP (Comité euro-international du béton - Fédération Internationale de la Précontrainte). Mallinormeja on julkaistu tähän mennessä kolme – vuosien 1978, 1990 ja 2010 mallinormit.

NCCI 2 on Liikenneviraston laatima eurokoodin soveltamisohje, ja sitä käytetään muun muassa yleisten teiden siltojen ja rautatiesiltojen suunnittelussa. NCCI 2:n mukaiset suunnittelu- ja mitoitusmenetelmät täyttävät eurokoodin asettamat vaatimustasot, jolloin sen käyttö on perusteltua, vaikka jotkut menetelmät hieman eroavatkin eurokoodin mukaisista menetelmistä.



## 2. RISTIKKOANALOGIAN MUKAINEN MITOITUS

Tässä luvussa esitetään betonin, betoniteräksen ja jänneteräksen oleelliset materiaaliominaisuudet. Lisäksi tässä luvussa esitetään massiivisen poikkileikkauksen puristusmurtokestävyyden mitoitus yhdistetyillä rasituksilla EN 1992-2 kohdan 6.3.2 mukaan sekä NCCI 2 kohdan 6.3.1 mukaan. Molemmissa puristusmurtokestävyys voidaan esittää ristikkoanalogian mukaisesti puristussauvan kestävyytensä. Lopuksi käsitellään edellä mainittujen mitoitusapojen eroja ja niiden vaikutuksia määritettyyn kestävyYTEEN.

### 2.1 Materiaaliominaisuudet

Siltojen päällysrakenteet kuuluvat toteutusluokkaan 3 ja toleranssiluokkaan 2, jolloin materiaaleille voidaan käyttää pienennettyjä osavarmuuslukuja [4, s. 25]. Tässä alaluvussa esitetyt materiaalien osavarmuusluvut ovat pienennettyjä.

Jokaiselle materiaalille esitetään jännitys-muodonmuutosyhteys. Lineaari-kimmoisella alueella materiaalin jännityksen ( $\sigma$ ) ja venymän ( $\varepsilon$ ) välinen yhteys saadaan Hooken laista, joka voidaan ilmaista muodossa

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (1)$$

jossa E on materiaalin kimmokerroin.

#### 2.1.1 Betoni

Siltojen suunnittelussa käytettävän betonin lujuusluokka on rajoitettu standardissa EN 1992-2 ja ohjeessa NCCI 2 välille C25/30...C70/85. Näitä lujuusluokkia vastaavat lujuuden ominaisarvot ja muodonmuutosominaisuudet on esitetty alla olevassa taulukossa (*Taulukko 1*).

**Taulukko 1.** *Betonin lujuus ja muodonmuutosominaisuudet [4, s. 11]*

Betonin lujuusluokka									
$f_{ck}$ (MPa)	25	30	35	40	45	50	55	60	70
$f_{ck,cube}$ (MPa)	30	37	45	50	55	60	67	75	85
$f_{cm}$ (MPa)	33	38	43	48	53	58	63	68	78
$f_{ctm}$ (MPa)	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2
$E_{cm}$ (GPa)	31	33	34	35	36	37	38	39	41
$\varepsilon_{c2}$ (‰)	2,0						2,2	2,3	2,4
$\varepsilon_{cu2}$ (‰)	3,5						3,1	2,9	2,7
$n$	2,0						1,75	1,6	1,45
$\varepsilon_{c3}$ (‰)	1,75						1,8	1,9	2,0
$\varepsilon_{cu3}$ (‰)	3,5						3,1	2,9	2,7

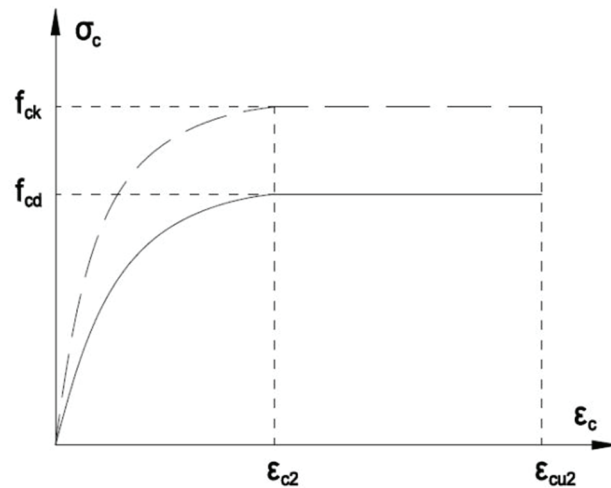
Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo saadaan kaavasta

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}, \quad (2)$$

jossa  $\alpha_{cc}$  on kerroin, jonka avulla otetaan huomioon puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikaistekijät,  $f_{ck}$  on betonin lieriölujuuden ominaisarvo 28 vuorokauden ikäisenä ja  $\gamma_c$  on betonin osavarmuysluku [8, s. 14]. Kertoimelle  $\alpha_{cc}$  käytetään arvoa 0,85, ja betonin osavarmuysluvulle arvoa 1,35 [4, s. 17]. Poikkileikkauksen mitoituksessa betonin puristusjännitys ( $\sigma_c$ ) saadaan venymän avulla kaavasta

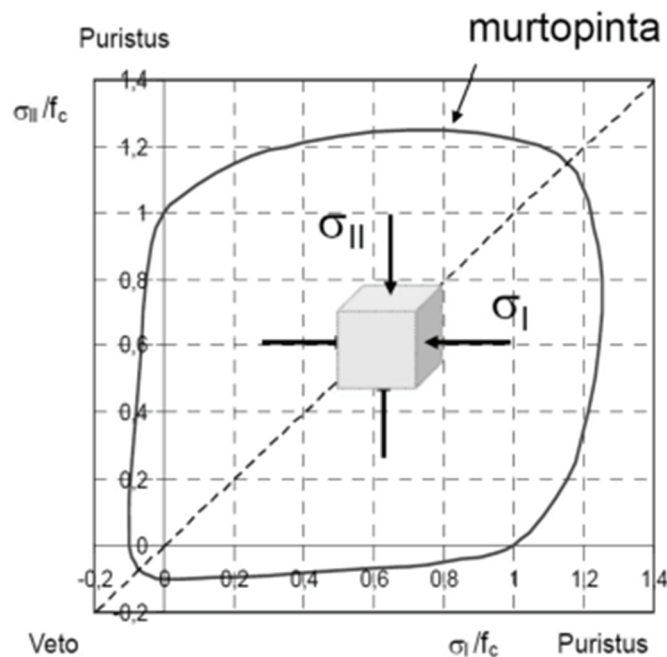
$$\sigma_c = \begin{cases} f_c \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] & \text{kun } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \\ f_c & \text{kun } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} \end{cases}, \quad (3)$$

jossa  $f_c$  on betonin puristuslujuuden mitoitus- tai ominaisarvo mitoitustarkastelusta riippuen,  $\varepsilon_c$  on betonin venymä (puristuma positiivisena),  $n$  on eksponentti,  $\varepsilon_{c2}$  on muodonmuutos puristuslujuuden saavuttamiskohdassa ja  $\varepsilon_{cu2}$  on murtopuristuma [4, s. 18]. Arvot  $n$ ,  $\varepsilon_{c2}$  ja  $\varepsilon_{cu2}$  saadaan yllä olevasta taulukosta (Taulukko 1). Näiden kaavojen mukainen jännitys-muodonmuutos-kuvio on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 1).



**Kuva 1.** Mitoituksessa käytettävä puristetun betonin jännitys-muodonmuutos-kuvio. Jatkuvalla viivalla on esitetty jännityksen mitoitusarvo ja katkoviivalla jännityksen ominaisarvo. [4, s. 18]

Kaksi- ja kolmiakselisessa jännitystilassa betonin lujuus eroaa yksiakselisesta jännitystilasta. Alla olevassa kuvassa (Kuva 2) on esitetty betonin lujuus kaksiakselisessa jännitystilassa pääjännitysten ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ) avulla. Pääjännityksistä on kerrottu lisää alaluvussa 3.2.



**Kuva 2.** Betonin lujuus kaksiakselisessa jännitystilassa [9, s. 14]

Kuvasta (Kuva 2) nähdään, että kun molemmat pääjännitykset ovat puristusjännitystä, betonin puristuslujuus kasvaa. Kun pääjännityksistä toinen on puristusta ja toinen vetoa, betonin puristuslujuus pienenee toisen suunnan vetojännitysten kasvaessa. Vastaavasti vetolujuus pienenee toisen suunnan puristusjännitysten kasvaessa. Betonin vetolujuuden

ylittyessä betoni halkeaa ja se ei pysty enää välittämään vetojännityksiä halkeaman normaaliin nähden.

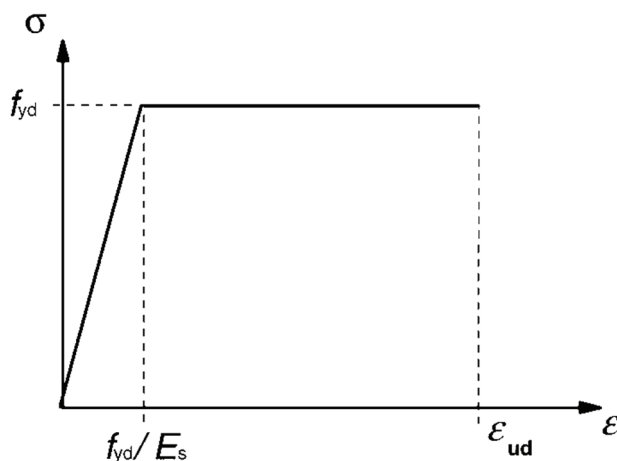
### 2.1.2 Betoniteräs

Silloissa käytetään yleensä betoniterästä, jonka myötölujuuden ominaisarvo ( $f_{yk}$ ) on 500 MPa [4, s. 20]. Betoniteräksen myötölujuuden mitoitusarvo saadaan kaavasta

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}, \quad (4)$$

jossa  $\gamma_s$  on betoniteräksen osavarmuusluku, jolle käytetään arvoa 1,1.

Betoniteräksen jännitys-muodonmuutos-kuvioksi suositellaan vaihtoehtoa, jossa myötörajan saavuttamisen jälkeen jännitys pysyy vakiona ja muodonmuutoksen yläraja-arvona ( $\epsilon_{ud}$ ) käytetään arvoa 10 ‰. Kimmokertoimen ( $E_s$ ) arvo on 200 GPa. Alla olevassa kuvassa (Kuva 3) on esitetty mitoituksessa käytettävä betoniteräksen suositeltu jännitys-muodonmuutos-kuvio, jossa jännitys voi olla joko puristusta tai vetoa. [4, s. 22]



**Kuva 3.** Betoniteräksen jännitys-muodonmuutos-kuvio. Perustuu lähteeseen [10, s. 41]

### 2.1.3 Jänneteräs

Jänneteräkselle määritellään 2 lujuusominaisuutta, jotka ovat jänneteräksen vetolujuuden ominaisarvo ( $f_{pk}$ ) ja 0,1-raja ( $f_{p0,1k}$ ). 0,1-rajan mukaisella jännityksellä jänneteräkseen aiheutuu 0,1 ‰ pysyvä muodonmuutos. [10, s. 43] Alla olevassa taulukossa on esitetty sillanrakennuksessa tavanomaisten jänneteräspunosten ominaisuuksia.

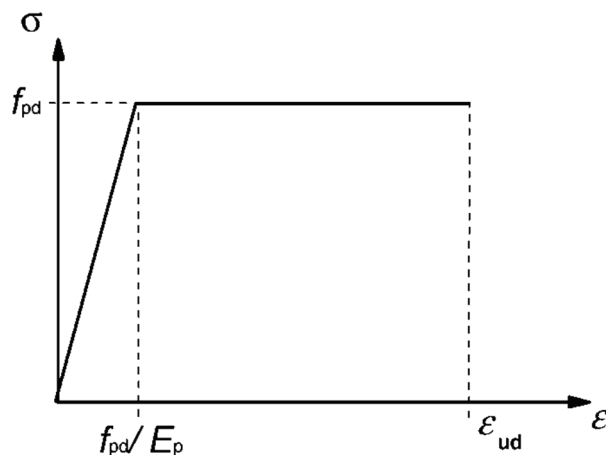
**Taulukko 2.** Tavanomaisten punostyyppien nimellishalkaisijat ( $D_n$ ), nimellispoikkipinta-alat ( $A_p$ ), lujuusluokat ( $f_{p0,1k}/f_{pk}$ ) ja kimmokerroin ( $E_p$ ) [4, s. 23].

Punostyyppi	$D_n$ mm	$A_p$ mm <sup>2</sup>	Lujuusluokka $f_{p0,1k}/f_{pk}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_p$ N/mm <sup>2</sup>
Y1860S7 tai Y1770S7	15,7	150	1600/1860 tai 1520/1770	195 000
	15,3	140		

Jänneteräksen vetolujuuden mitoitusarvo saadaan kaavasta

$$f_{pd} = \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_p}, \quad (5)$$

jossa  $\gamma_p$  on jänneteräksen osavarmuusluku, jolle käytetään arvoa 1,1. Jänneteräksen jännitys-muodonmuutos-kuvioksi suositellaan vaihtoehtoa, jossa myötörajan saavuttamisen jälkeen jännitys pysyy vakiona ja muodonmuutoksen yläraja-arvona ( $\epsilon_{ud}$ ) käytetään arvoa 20 %. [4, s. 24] Alla olevassa kuvassa (Kuva 4) on esitetty mitoituksessa käytettävä jänneteräksen suositeltu jännitys-muodonmuutos-kuvio.



**Kuva 4.** Jänneteräksen jännitys-muodonmuutos-kuvio. Perustuu lähteeseen [10, s. 45]

## 2.2 Puristusmurto

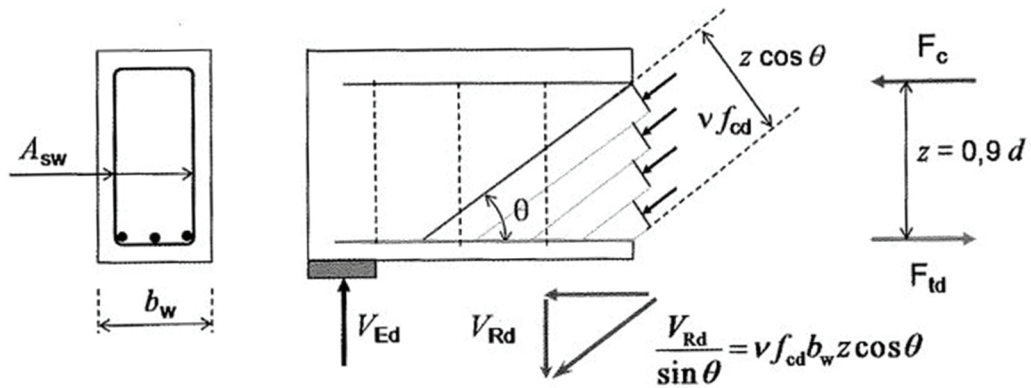
Puristusmurto tapahtuu, kun betonissa oleva puristusjännitys ylittää puristuskestävyyden. Murtuminen tapahtuu äkillisesti ja ilman stabiilin tasapainotilan syntymistä. Jos puristusmurto tapahtuu ennen raudituksen myötäämistä, se on luonteeltaan hauras ja se ei anna selviä ulkoisia merkkejä ennen murtumista. [11, s. 201–202] Jos betoni murtuu raudituksen myötäämisen jälkeen, murtotapa on sitkeä.

Puristusmurtoa tarkastellessa betonissa saattaa esiintyä myös veto- tai puristusjännityksiä, jotka vaikuttavat kohtisuoraan suhteessa puristusjännityksen suuntaan. Tällaisessa jännitystilassa betonin puristuslujuuden pieneminen tai suureneminen otetaan huomioon puristuslujuuden pienennys- tai suurennuskertoimella.

Ristikkoanalogiaan perustuvassa mitoituksessa eurokoodissa ja NCCI 2:ssa halkeilleen betonin puristuslujuuden pienennyskertoimena ( $\nu$ ) käytetään arvoa

$$\nu = 0,6 \left( 1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} \right). \quad (6)$$

Betonin puristuskestävyys ( $\sigma_{cd,max}$ ) saadaan kertomalla pienennyskertoimella betonin puristuslujuuden mitoitusarvoa. Alla olevassa kuvassa (Kuva 5) on havainnollistettu ristikkoanalogian mukaista puristussauvan kestävyyslaskentaa palkissa, johon kohdistuu leikkausvoima.



**Kuva 5.** Puristussauvan kestävyyslaskennan periaate [12, s. 137].

### 2.3 Puristusmurtokestävyys yhdistetyillä rasituksilla EN 1992-2 mukaan

Eurokoodissa puristussauvan puristusmurto yhdistetyillä rasituksilla huomioidaan vain vääntömomentin ja leikkausvoiman osalta. Niiden yhteisvaikutuksen on täytettävä umpi-poikkileikkauksissa ehto

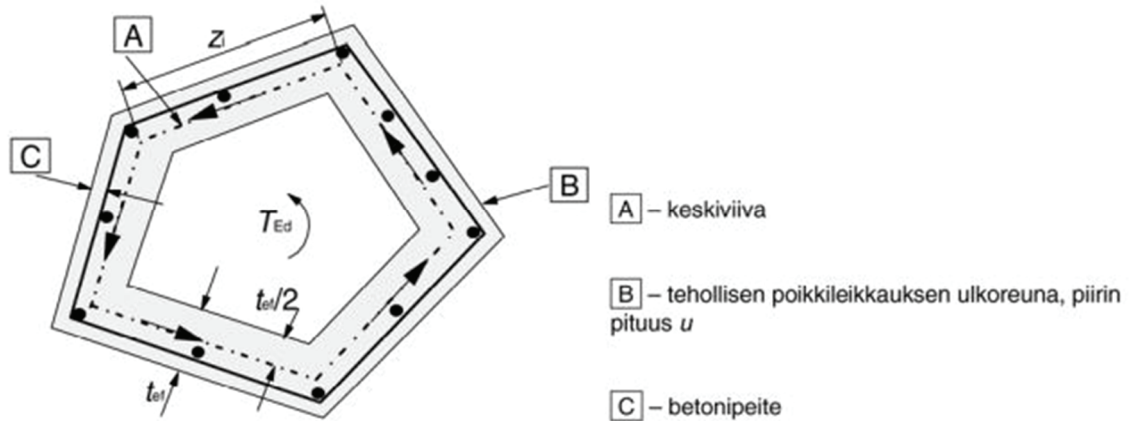
$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 1, \quad (7)$$

jossa  $T_{Ed}$  ja  $V_{Ed}$  ovat vääntömomentin ja leikkausvoiman mitoitusarvot sekä  $T_{Rd,max}$  ja  $V_{Rd,max}$  ovat vääntö- ja leikkauskestävyyden suurimmat mitoitusarvot eli ylärajat.

Vääntökestävyyden yläraja lasketaan kaavalla

$$T_{Rd,max} = 2\nu\alpha_{cw} f_{cd} A_k t_{ef} \sin\theta \cos\theta, \quad (8)$$

jossa  $\alpha_{cw}$  on kerroin, joka ottaa huomioon poikkileikkauksen puristusjännitystilän vaikutuksen,  $t_{ef}$  on tehollisen seinämän paksuus,  $A_k$  on seinämien keskiviivojen rajaaman alueen pinta-ala ja  $\theta$  on puristussauvojen kaltevuuskulma vaakatason suhteen. Alla olevassa kuvassa (Kuva 6) on selvennetty näitä merkintöjä.



**Kuva 6.** Tehollisen kotelopoikkileikkauksen merkinnät [10, s. 94].

Seinämän tehollinen paksuus on vähintään reunan ja pääraudoituksen painopisteen etäisyys kaksinkertaisena ja enintään poikkileikkauksen ulkopintojen rajaama pinta-ala ( $A$ ) jaettuna sen piirillä ( $u$ ). Seinämän paksuuden saa vapaasti valita näiden raja-arvojen väliltä. Väännöstä aiheutuva leikkausvuo kohdistuu laskennallisesti vain tehollisen seinämaalueen sisälle yllä esitetyn kuvan (Kuva 6) mukaisesti ja sen arvo on vakio [13, s. 167]. Puristussauvojen kaltevuuskulma voidaan valita väliltä  $21,8^\circ$ – $45,0^\circ$ . Sen kuitenkin tulee olla yhteneväinen kaavoissa (8) ja (10). Lisäksi raudoituksen suunnittelussa tulee käyttää samaa kulmaa.

Puristusjännitystilän vaikutuskerroin lasketaan kaavalla

$$\alpha_{cw} = \begin{cases} 1 & \text{kun rakenne on jännittämätön} \\ 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} & \text{kun } 0 < \sigma_{cp} \leq 0,25f_{cd} \\ 1,25 & \text{kun } 0,25f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,5f_{cd} \\ 2,5 \left(1 - \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) & \text{kun } 0,5f_{cd} < \sigma_{cp} < 1,0f_{cd} \end{cases}, \quad (9)$$

missä  $\sigma_{cp}$  on betonissa vallitsevan normaalivoiman mitoitusarvon  $N_{Ed}$  aiheuttama keskimääräinen jännitys raudoitus huomioiden. Jännitystä ei tarvitse ottaa huomioon, jos tarkasteltava poikkileikkaus sijaitsee lähempänä tuen reunaa kuin  $0,5d \cot\theta$ , jossa  $d$  on poikkileikkauksen tehollinen korkeus.

Leikkauskestävyyden suurin mitoitusarvo lasketaan pystysuoran leikkausraudoituksen tapauksessa kaavasta

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} / (\cot\theta + \tan\theta), \quad (10)$$

jossa  $b_w$  on poikkileikkauksen vedetyn alueen pienin leveys,  $z$  on poikkileikkauksen sisäinen momenttivarsi murtorajatilassa ja  $v_1$  on pienennyskerroin, jonka suositusarvo on  $v$ . Jos leikkausraudoituksen mitoitusjännitys on alle 80 % myötölujuuden ominaisarvosta  $f_{yk}$ , pienennyskerroin  $v_1$  voidaan käyttää arvoa

$$v_1 = \begin{cases} 0,6 & \text{kun } f_{ck} \leq 60 \text{ MPa} \\ 0,9 - \frac{f_{ck}}{200} > 0,5 & \text{kun } f_{ck} > 60 \text{ MPa} \end{cases} \quad (11)$$

## 2.4 Puristusmurtokestävyys yhdistetyillä rasiuksilla NCCI 2 mukaan

Puristusmurtokestävyyden laskenta NCCI 2:ssa perustuu Suomen rakentamismääräyskoelman Betonirakenteet-ohjeen mukaiseen laskentaan. Taivutusmomentin, vääntömomentin ja leikkausvoiman mitoitusarvojen on yhteisvaikutuksen osalta täytettävä seuraavat ehdot:

- i. Leikkausvoiman ja vääntömomentin yhteisvaikutuksen on täytettävä ehto

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 1. \quad (12)$$

Vääntömomentille voidaan käyttää tehollisen korkeuden etäisyydellä tuesta olevaa arvoa.

- ii. Taivutus- ja vääntömomentin yhteisvaikutuksen on täytettävä ehto

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} + \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd,max}} \leq 1, \quad (13)$$

jossa  $M_{Ed}$  on taivutusmomentin mitoitusarvo ja  $M_{pl,Rd,max}$  on poikkileikkauksen plastinen taivutuskestävyys tasapainoraidoitettuna.

Vääntökestävyyden yläraja lasketaan kaavalla

$$T_{Rd,max} = 0,25 f_{cd} W_{tr}, \quad (14)$$

jossa  $W_{tr}$  on vääntöhalkeilun jälkeen muodostuneen kotelopoikkileikkauksen vääntövastus. Jos poikkileikkaus on massiivinen ja jännitetty sekä betonin jännitys normaalivoiman mitoitusarvosta toteuttaa ehdon  $0,1 f_{cd} < \sigma_{cp} < 0,5 f_{cd}$ , vääntökestävyyden yläraja voidaan laskea kaavasta

$$T_{Rd,max} = 0,30 f_{cd} W_{tr}. \quad (15)$$



Vääntöhalkeilun jälkeen muodostuneen tehollisen kotelopoikkileikkauksen vääntövastus saadaan laskettua kaavasta

$$W_{tr} = 2A_{ef}t_{ef}, \quad (16)$$

jossa  $A_{ef}$  on pitkittäistankojen painopisteakseleiden kautta piirretyn monikulmion pinta-ala ja  $t_{ef}$  on tehollisen kotelopoikkileikkauksen seinämän paksuus, joka on 30 % pinta-alaan  $A_{ef}$  sisään piirretyn suurimman mahdollisen ympyrän säteestä.

Leikkauskestävyyden yläraja lasketaan kaavalla

$$V_{Rd,max} = 0,25b_wdf_{cd}, \quad (17)$$

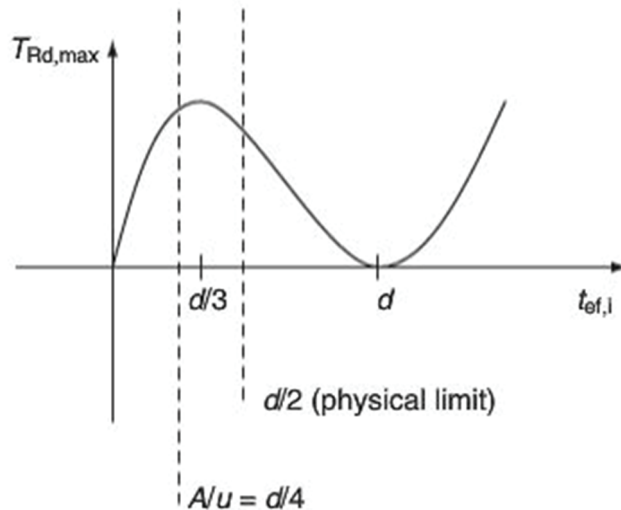
jossa  $b_w$  on palkin uuman leveys palkin alapinnan korkeudella ja  $d$  on palkin tehollinen korkeus. Kaavan (17) yhteydessä betonin puristuslujuuden  $f_{cd}$  laskennassa saa käyttää korkeintaan lujuusluokkaa C50/60 ja betonin tiheyden tulee olla vähintään 2400 kg/m<sup>3</sup>.

## 2.5 Mitoitustapojen erot ja niiden vaikutukset

Mitoitustapoja tarkastellessa huomataan NCCI 2 kaavojen olevan yksinkertaistetumpia verrattuna eurokoodin vastaaviin kaavoihin. Eurokoodi mahdollistaa seinämäpaksuuden ja puristussauvan kaltevuuskulman valinnan. Se myös mahdollistaa jännevoiman huomiointi ottamisen tarkemmin. Lisäksi eurokoodin leikkauskestävyyden kaavassa on käytetty poikkileikkauksen sisäistä momenttivartta  $z$ , kun taas NCCI 2:n vastaavassa kaavassa on käytetty poikkileikkauksen tehollista korkeutta  $d$ . Jos otaksutaan kaavassa (10) puristussauvan kulmaksi 45 astetta, pienennyskertoimen ( $\nu$ ) arvoksi 0,6 ja normaalivoimaksi 0, kuvitteellinen sisäinen momenttivarsi NCCI 2:n kaavassa (17) olisi tällöin vastaavalla tuloksella noin  $0,83d$ .

Puristussauvan kaltevuuskulman ollessa 45° saadaan suurin puristumurtokestävyys. Silloin myös saadaan vääntöraudoituksen pienin kokonaisraudoitusmäärä [12, s. 177]. Pienemmällä kulmalla puristumurtokestävyys pienenee lisäksi pituussuuntaisen raudoituksen rasitus suurenee ja hakaraudoituksen rasitus pienenee [12, s. 140, 177]. Kulman ollessa 45° ja pienennyskertoimen ollessa 0,5, eurokoodin vääntökestävyyden ylärajan kaava (8) jännittämättömällä poikkileikkauksella yksinkertaistuu NCCI 2:ssa esitettyä kaavaa (14) vastaavaksi.

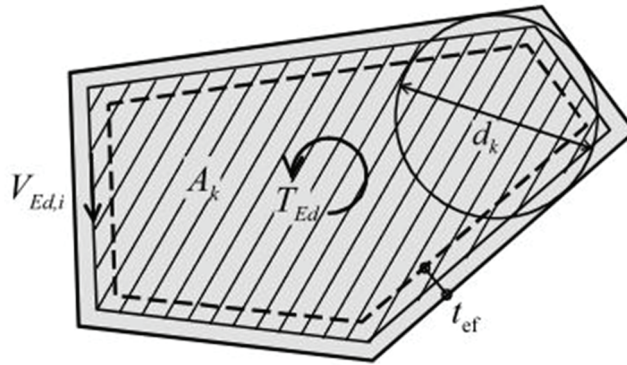
Tehollisen seinämän paksuudella on suuri vaikutus puristumurtokestävyyteen. Alla esitetyn kuvan (Kuva 7) mukaan seinämän paksuuden ollessa eurokoodin ylärajan ( $A/u$ ) mukainen neliöpoikkileikkauksen puristumurtokestävyys on lähellä teoreettista maksimiarvoa.



**Kuva 7.** Neliöpoikkileikkauksen puristusmurtokestävyys tehollisen seinämäpaksuuden funktiona [13, s. 170].

Vääntökestävyyden ylärajan määrittämisen menetelmä NCCI 2:ssa on lähes samanlainen kuin vuoden 1978 CEB-FIP mallinormissa. Siinä tehollisen seinämän paksuus on kolmasosa pinta-alan  $A_{ef}$  sisään piirretyn suurimman mahdollisen ympyrän säteestä, joka on hyvin lähellä NCCI 2 mukaista arvoa. [14, s. 126] CEB-FIP mallinormissa esitetty yhtälö on alun perin johdettu silloissa käytettävistä isoista kotelopoikkileikkauksista ja myös kalibroitu tällaisille poikkileikkauksille [15, s. 361]. Hsu:n mukaan [15, s. 361] ympyrämenetelmällä määritetty seinämän tehollinen paksuus vastaa suuruusluokaltaan arvoa  $0,45A/u$ , joka on 45 % eurokoodin mukaisesta seinämäpaksuuden ylärajan arvosta. Näin ollen NCCI 2:n mukainen vääntökestävyyden yläraja on pienempi kuin eurokoodin suurin sallima arvo, vaikka pinta-alojen ( $A_k$  ja  $A_{ef}$ ) määrittämisestä johtuvat erot pienentävät edellä mainittujen vääntökestävyyksien ylärajojen eroja. Toisaalta NCCI 2:n avulla laskettu vääntökestävyyden yläraja saattaa olla sopivampi isoille poikkileikkauksille, sillä NCCI 2:n kaavat on myös kalibroitu niille.

Vuoden 2010 mallinormissa tehollisen seinämän paksuus on neljäsosa poikkileikkauksen ohuimman kohdan sisään piirretyn ympyrän säteestä ja minimissään kaksinkertainen etäisyys pituussuuntaisesta raudoituksesta poikkileikkauksen pintaan [7, s. 381]. Ympyrän sijoittamisen periaate on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 8).



**Kuva 8.** Ympyrän sijoittaminen poikkileikkauksen sisään vuoden 2010 mallinormin mukaan [7, s. 381].

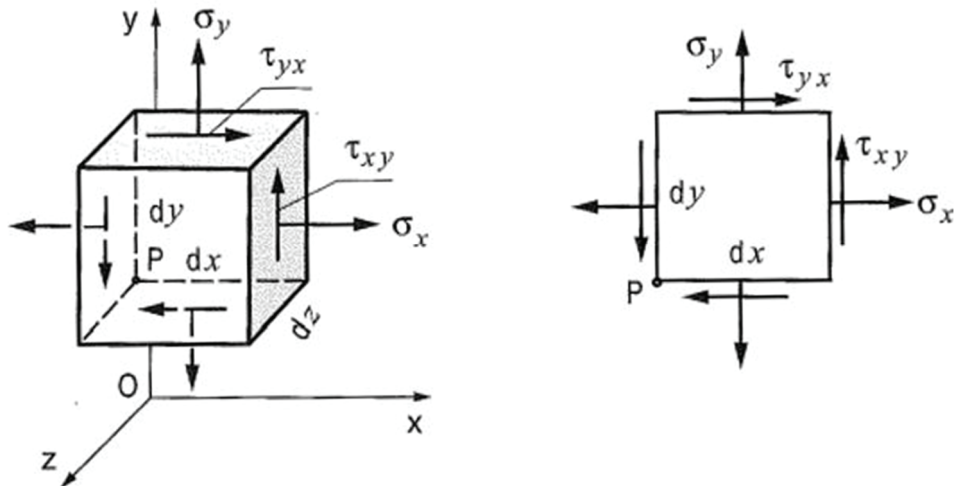
Vuoden 2010 mallinormissa tehollisen seinämän paksuus suurilla suorakulmaisilla poikkileikkauksilla, joissa pituussuuntaiset teräkset ovat lähellä pintaa suhteessa poikkileikkauksen paksuuteen, on pienempi kuin vuoden 1978 mallinormissa. Yllä olevan kuvan (Kuva 8) mukaisessa poikkileikkauksessa tehollisen seinämän paksuuserot mallinormien välillä vain kasvavat.

Eurokoodissa ei ole ristikkoanalogian mukaista mitoitus tapaa puristusmurrolle, joka voi tapahtua väännön ja taivutuksen yhteisvaikutuksessa. Näiden yhdistelmä voi aiheuttaa kriittisen puristavan jännityksen puristussauvassa, etenkin jos taivutusmomentti on suhteellisen suuri [15, s. 362]. Toisaalta NCCI 2:ssa väännön ja taivutuksen vaikutukset summataan yhteen, vaikka väännöstä ja taivutuksesta aiheutuvien puristussauvojen suuntakulmat eivät vastaa toisiaan.

### 3. TASOJÄNNITYSTILAN MUKAINEN MITOITUS

Jännityselementti on kappaleesta leikattu differentiaalin suorakulmainen särmiöelementti, jolla kuvataan kappaleen pisteen jännitystilaa. Sen koordinaatistoksi valitaan yleensä suoraviivainen ja suorakulmainen  $xyz$ -koordinaatisto. Jännityselementin tahkot ovat koordinaattitasojen suuntaisia ja niiden jännitysvektorit jaetaan koordinaattiakselien suuntaisiin komponentteihin. [16, s. 80]

Tasojännitystila on kappaleen pisteen jännitystilän erityistapaus, jossa vähintään yksi pääjännitys on nolla. Kun valitaan  $z$ -akseli pääjännitystä  $\sigma_3 = 0$  vastaavaan pääsuuntaan alla olevan kuvan (Kuva 9) mukaisesti ja merkitään  $\tau_{yx} = \tau_{xy}$ , mahdolliset nolasta poikkeavat jännityskomponentit ovat normaali-jännitykset  $\sigma_x$  ja  $\sigma_y$  sekä leikkausjännitys  $\tau_{xy}$  [16, s. 313] Pääjännityksistä on kerrottu lisää alaluvussa 3.2.



**Kuva 9.** Tasojännitystilän jännityselementti [16, s. 313]

Tasojännitystilaa sanotaan myös kaksiaksaaliseksi jännitystilaksi, sillä jännityselementillä on aina olemassa asento, jossa leikkausjännitykset häviävät. Jos taas jännityselementillä on olemassa asento, jossa normaali-jännitykset häviävät ja leikkausjännitys on nolasta poikkeava, jännitystilaa sanotaan puhtaaksi tasoleikkausjännitystilaksi. Kaksiaksaalisen jännitystilän erikoistapauksena on aksiaalinen jännitystila, jossa yksi pääjännitys on nolasta poikkeava. Yksiaksaalisen jännitystilän erikoistapauksena on lepotila, jossa ei ole pääjännityksiä ollenkaan. [16, s. 89]

### 3.1 Tasojännitystilan määrittäminen

Tässä alaluvussa esitetään eri rasiusten aiheuttamat tasojännitystilat umpipoikkileikkauksessa. Tasojännitystilat esitetään sekä kimmo- että plastisuusteorian mukaan. Lopuksi kerrotaan kriittisistä alueista, joissa voi tapahtua betonin puristusmurto, sekä esitetään erilaisia tarkastelutapoja puristumurron arviointiin.

Tasojännitystila voidaan määrittää erikseen eri rasituksille. Tällöin tasojännitystilat voidaan lopuksi summata yhteen niiden koordinaatiston suunta huomioiden. Yleensä on tarkoituksenmukaista käyttää yhteneväistä koordinaatistoa samaa pistettä tarkastellessa, jolloin tasojännitystilojen yhteenlasku on helpompaa.

#### 3.1.1 Leikkaus

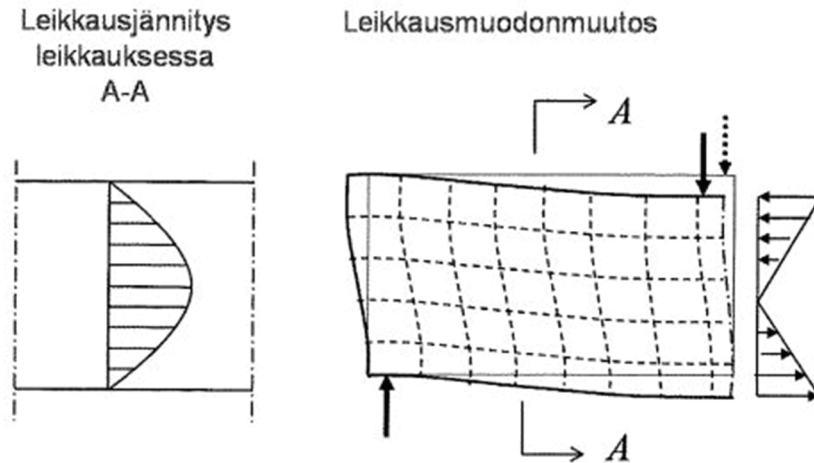
Kimmoisella alueella leikkausjännitys halkeilemattoman homogeenisen palkin uumassa saadaan kaavasta

$$\tau = \frac{VS}{b_w I}, \quad (18)$$

jossa  $V$  on leikkausvoima,  $S$  on tarkasteltavan kohdan rajaaman ulkopuolisen osan staattinen momentti uuman painopisteen suhteen ja  $I$  on poikkileikkauksen jäyhyysmomentti. Suorakaidepoikkileikkauksella suurin leikkausjännitys ( $\tau_{max}$ ) sijaitsee palkin keskilinjalla ja se saadaan kaavasta

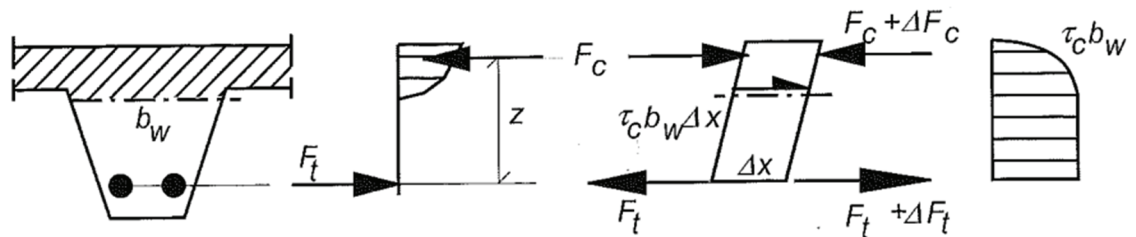
$$\tau_{max} = 1,5 \frac{V}{b_w h}, \quad (19)$$

jossa  $h$  poikkileikkauksen korkeus. [11, s. 241] Kimmoisella alueella jännitys jakaantuu alla olevan kuvan (*Kuva 10*) mukaisesti.



**Kuva 10.** Leikkausjännitys ja -muodonmuutos kimmoisella alueella [12, s. 132].

Halkeilun seurauksena leikkausraudoitetussa rakenteessa leikkausjännitykset jakautuvat uudelleen. Taivutetun poikkileikkauksen leikkausjännitys voidaan ratkaista tasapainoehdosta halkeamien välissä alla olevan kuvan (Kuva 11) mukaisesti.



**Kuva 11.** Leikkausjännitysten tarkastelu ja jakautuminen halkeamien välillä [11, s. 242].

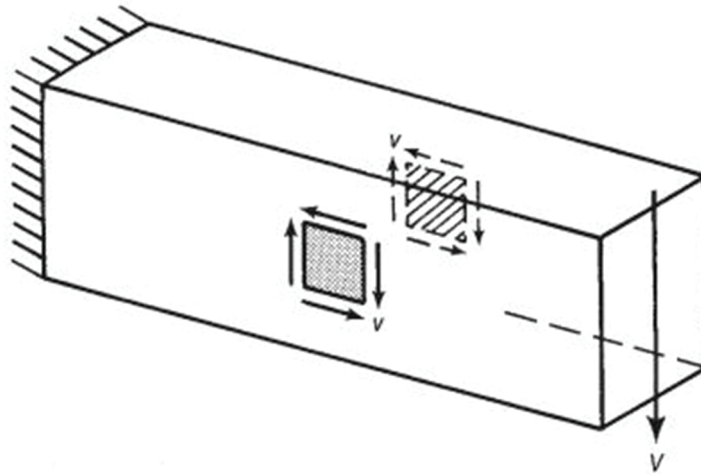
Leikkausjännitys neutraaliakselin ja vetovoiman resultantin välissä saadaan johdettua yllä olevan kuvan (Kuva 11) perusteella tasapainoehdosta

$$\Delta F_t = \tau_c b_w \Delta x = \frac{\Delta M}{z} = \frac{1}{z} \Delta x V, \quad (20)$$

jossa on käytetty yllä olevan kuvan (Kuva 11) mukaisia merkintöjä. Kaavasta (20) saadaan ratkaistua betonissa vaikuttava leikkausjännitys halkeilleessa poikkileikkauksessa ja sen suuruus on

$$\tau = \frac{V}{b_w z}, \quad (21)$$

jossa  $z$  on poikkileikkauksen sisäinen momenttivarsi. [11, s. 241][17, s. 248] Leikkausvoimasta aiheutuvat tasojännitystilat ovat alla esitetyn kuvan (Kuva 12) mukaisia.



**Kuva 12.** Leikkausvoimasta aiheutuva tasojännitystila, jossa  $v = \tau$  [17, s. 320].

ACI:n (*American Concrete Institute*) mukaisessa mitoituksessa kaavan (21) sisäinen momenttivarsi  $z$  on korvattu tehollisen poikkileikkauksen korkeudella  $d$ . Lisäksi monissa mitoitusohjeissa rakenneosan, jossa ei ole normaalivoimaa, sisäisenä momenttivartena voidaan käyttää likiarvoa  $0,9d$ . [10, s. 87][12, s. 136][17, s. 248] Näistä molemmat tavat yksinkertaistavat mitoitusta huomattavasti. Kuitenkin jännitetyissä rakenneosissa edellä esitetyt yksinkertaistukset saattavat johtaa epävarmalla puolella olevaan tulokseen [13, s. 149]. Jännitetyissä rakenneosissa sisäisen momenttivarren tulisi olla taivutusmomenttia vastaava [10, s. 87]. Vaihtoehtoisesti sisäinen momenttivarsi voidaan laskea taivutuskapasiteetin avulla. Sisäinen momenttivarsi saadaan tällöin molemmissa tapauksissa puristusvoiman resultantin ja vetovoimien painopisteen välisestä etäisyydestä. [13, s. 149] Vuoden 2010 mallinormissa jännitetyn rakenteen sisäinen momenttivarsi on laskettu kaavalla

$$z = \frac{z_s^2 A_s + z_p^2 A_p}{z_s A_s + z_p A_p}, \quad (22)$$

jossa  $A_s$  ja  $A_p$  ovat vetoraudoituksen ja jänteiden pinta-alat sekä  $z_s$  ja  $z_p$  ovat niitä vastaavat etäisyydet puristusresultanttiin [7, s. 365].

### 3.1.2 Vääntö

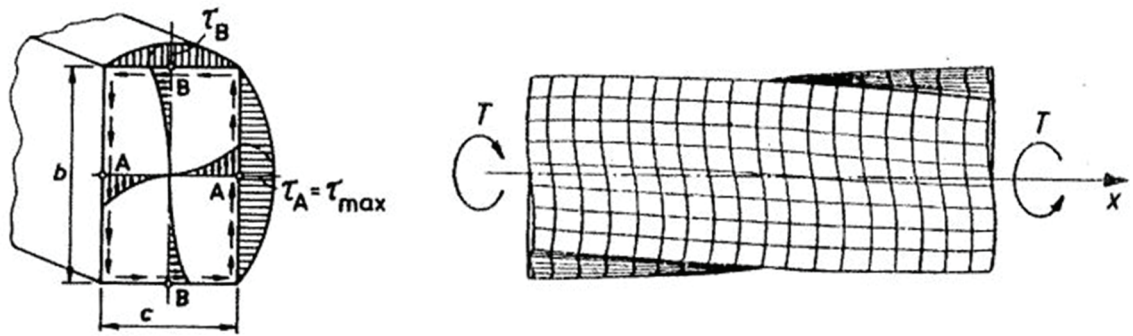
Homogeeniseen suorakaidepalkkiin väännöstä aiheutuva kimmoteorian mukainen leikkausjännitys jakauma on alla olevan kuvan (*Kuva 13*) mukainen. Suorakaidepoikkileikkauksella suurin leikkausjännitys ( $\tau_{max}$ ) sijaitsee pidempien sivujen keskikohdassa ja se saadaan laskettua kaavalla

$$\tau_{max} = \frac{T}{\alpha_e h b^2}, \quad (23)$$

jossa  $\alpha_e$  on korkeuden ja leveyden suhteen ( $h/b$ ) huomioon ottava kerroin, ja se saadaan alla esitetystä taulukosta (Taulukko 3) [16, s. 260][18, s. 387].

**Taulukko 3.** Kerroin  $\alpha_e$ . Perustuu lähteeseen [18, s. 387].

$h/b$	1	1,2	1,5	2	2,5	3	4	6	10	$\infty$
$\alpha_e$	0,208	0,219	0,231	0,246	0,258	0,267	0,282	0,299	0,312	0,333



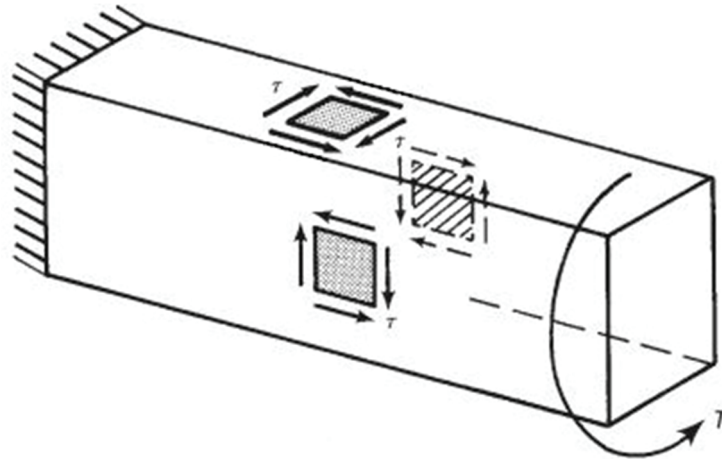
**Kuva 13.** Homogeenisen suorakaidepalkin väännöstä aiheutuvat leikkausjännitykset kimmoisella alueella (vasemmalla) ja muodonmuutokset (oikealla) [12, s. 168].

Halkeilun seurauksena vääntöraudoitetussa rakenteessa vääntöjäykkyys pienenee ja jännitykset jakautuvat uudelleen. Tällöin rakennetta voidaan kuvata yksinkertaistetusti tehollisen kotelopoikkileikkauksen avulla. [12, s. 172] Tehollisesta kotelopoikkileikkauksesta on kerrottu alaluvuissa 2.3 ja 2.4. Ohutseinämaisissä suljetuissa poikkileikkauksissa väännöstä aiheutuvaa leikkausjännitystä voidaan pitää vakiona seinämän paksuussuunnassa [16, s. 255]. Poikkileikkauksen ympäri kulkeva leikkausjännitysvuo on myös vakio. Yleensä myös tehollisen kotelopoikkileikkauksen jännitykset on laskettu tämän teorian mukaan [12, s. 174][13, s. 167][17, s. 317]. Tällöin tehollisessa poikkileikkauksessa vaikuttava leikkausjännitys voidaan laskea kaavasta

$$\tau = \frac{T}{2t_{ef}A_k}, \quad (24)$$

jossa  $t_{ef}$  ja  $A_k$  ovat alaluvun 2.3 mukaiset merkinnät [19, s. 153]. Väännöstä aiheutuvat leikkausjännitykset voidaan kuvata tasojaännitystilassa alla olevan kuvan (Kuva 14) mukaisesti.

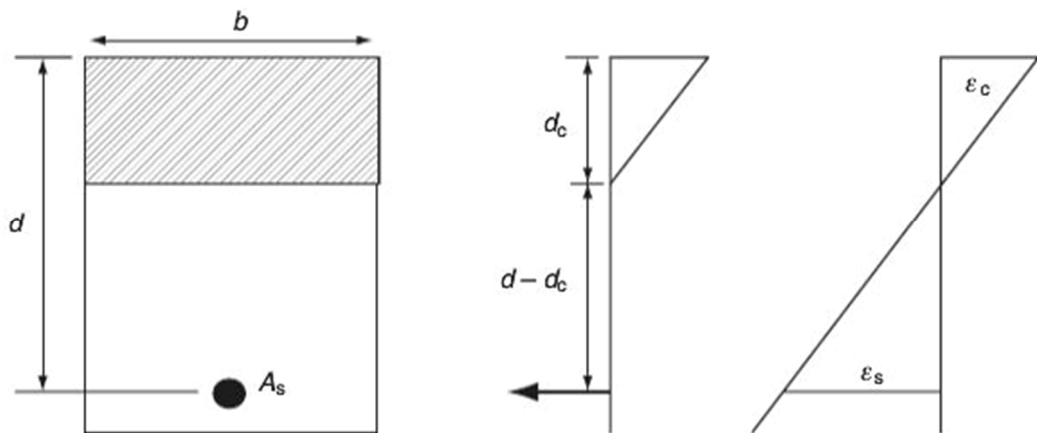




**Kuva 14.** Vääntömomentista aiheutuva tasojännitystila plastisuusteorian mukaan. Perustuu lähteeseen [17, s. 320].

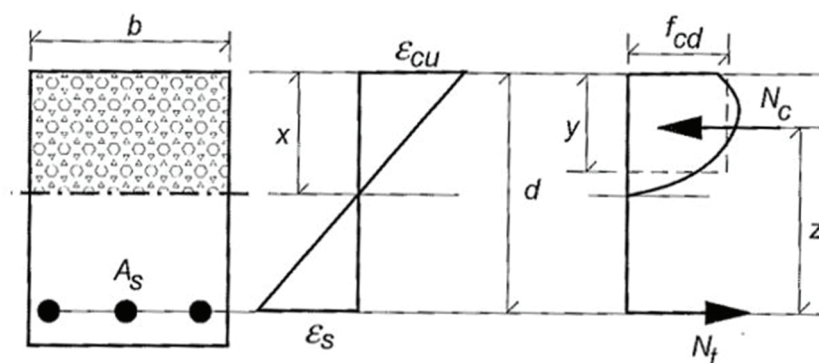
### 3.1.3 Taivutus ja puristus

Yleisen käytännön mukaan betonin vetolujuutta ei hyödynnetä taivutusmitoituksessa [4] [10][11], jolloin myöskään betoniin ei suoraan kohdistu taivutuksesta johtuvia vetojännityksiä. Kimmoteorian mukaisesti määritetty halkeilleen poikkileikkauksen jännitysjauma on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 15).



**Kuva 15.** Taivutuksesta aiheutuvat kimmoteorian mukaiset betonin jännitykset halkeilleessa poikkileikkauksessa (keskellä) sekä poikkileikkauksen muodonmuutokset (oikealla) [13, s. 227].

Poikkileikkauksen plastisoituessa betonin puristusjännitykset jakaantuvat uudelleen alla olevan kuvan (Kuva 16) mukaisesti. Käytännön laskentaa varten betonin puristusjännitykset on yleensä yksinkertaistettu jännityssuorakaiteeksi [11, s. 196], mutta taivutuskapasiteettia huomattavasti pienemmillä momenteilla se ei kuvaa betonin todellisia jännityksiä tarkasti.

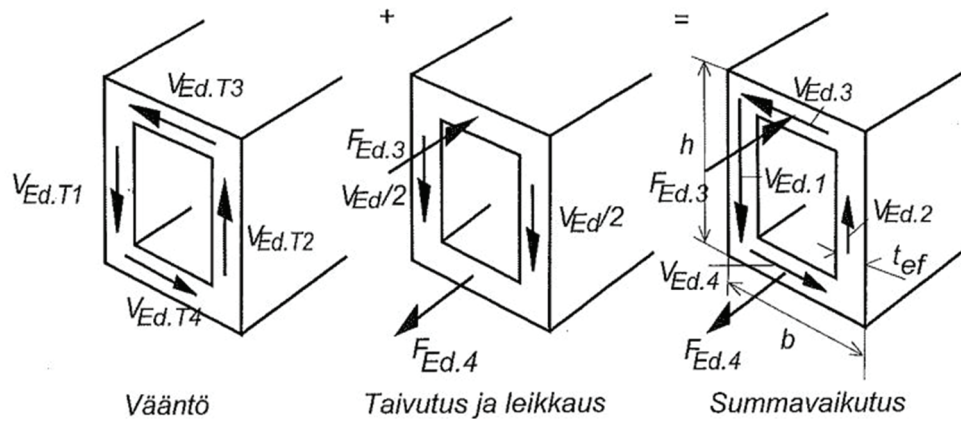


**Kuva 16.** Vetorausoitettun suorakaidepoikkileikkauksen taivutuksesta aiheutuvat poikkileikkauksen muodonmuutokset (keskellä) sekä plastiset betonin puristusjännitykset (oikealla), jossa yksinkertaistettu jännitys on piirretty katkoviivalla [11, s. 200].

Taivutus- ja puristusrasitetussa poikkileikkauksessa betonin puristusjännitykset voidaan ratkaista muodonmuutosten avulla käyttämällä jännitys-muodonmuutosyhteyttä eli materiaalimallia. Poikkileikkauksen muodonmuutos saadaan ratkaistua tasapainoehtojen avulla. Taivutusmomentti ja normaalivoima aiheuttavat poikkileikkaukseen yksiakseliisen jännitystilän.

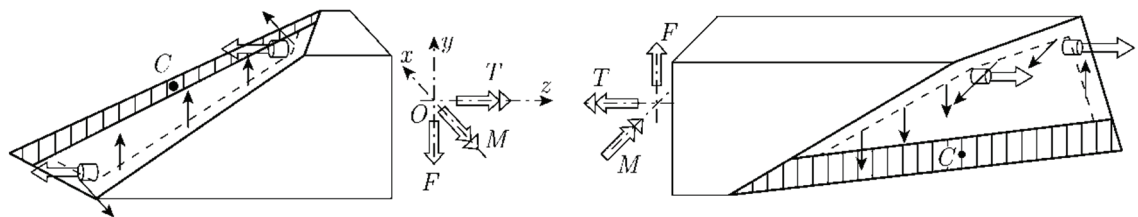
### 3.1.4 Jännitystilojen yhdistäminen ja tarkasteltavat alueet

Eri rasitusten aiheuttamat jännitystilat voidaan laskea suoraan yhteen poikkileikkauksen jokaisessa pisteessä, jos niiden jännityselementit ovat samansuuntaisia. Määräävimmat pisteet yhdistetyillä rasituksilla sijaitsevat poikkileikkauksen ulkoreunassa ja sen läheisyydessä, sillä taivutus- ja vääntörasitus aiheuttavat sinne suurimman jännitystilän. Jännitysten jakaantumisen periaatetta ja yhteisvaikutusta massiivisessa poikkileikkauksessa voidaan yksinkertaistusti kuvata voimavaikutusten jakaantumisella ja yhdistämisellä kotelopoikkileikkauksessa, mikä on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 17).



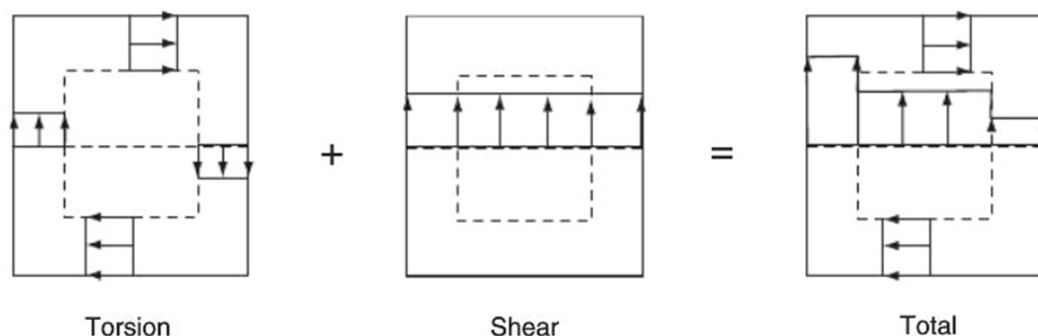
**Kuva 17.** Voimavaikutusten yhdistäminen kotelopoikkileikkauksessa [11, s. 312].

Leikkauksesta aiheutuvien leikkausjännitysten voidaan otaksua jakaantuvan pääasiassa puristusresultantin vetopuolelle alaluvussa 3.1.1 esitetyn kuvan (Kuva 11) mukaisesti, jolloin tarkasteltava puristusalueen jännitystila voidaan yksinkertaistaa tasojännitystilaksi. Vedettyä oleva tarkastelualue jätetään ottamatta huomioon puristumurron kannalta, sillä siellä tapahtuva puristumurto ei johda suoraan taivutuksen tasapainon menetykseen ja vedetty pinta on rajattu tämän tutkimuksen ulkopuolelle. Tällöin suorakulmaisessa palkissa puristumurron kannalta tarkasteltavia alueita ovat taivutuksen suunnan suhteen poikkileikkauksen puristuspuolelta tarkasteltavia alueita ovat taivutuksen suunnan suhteen poikkileikkauksen puristuspuolelta tarkasteltavia alueita ovat taivutuksen suunnan suhteen poikkileikkauksen puristuspuolelta tarkasteltavia alueita ovat taivutuksen suunnan suhteen poikkileikkauksen puristuspuolelta tarkasteltavia alueita.



**Kuva 18.** Puristusjännityksen suuntainen puristumurtopinta taivutusmomentin suunnan suhteen sivualueella (vasemmalla) ja puristusalueella (oikealla) [20, s. 134].

Sivualueilla puristumurto voi tapahtua leikkauksesta, väännöstä tai niiden yhteisvaikutuksesta. Lisäksi on otettava huomioon taivutuksesta ja normaalivoimasta aiheutuva puristus- tai vetojännitys. Väännöstä ja leikkauksesta aiheutuvien tasoleikkausjännitystilojen leikkausjännityskomponentit ovat toisella sivulla samansuuntaiset ja toisella sivulla vastakkaisuuntaiset, jolloin niiden summavaikutus on toisella sivulla leikkausjännitystä suurentava ja vastaavasti toisella sivulla leikkausjännitystä pienentävä. Alla esitetyssä kuvassa (Kuva 19) on havainnollistettu leikkauksen ja väännön yhteisvaikutusta.



**Kuva 19.** Leikkauksen ja väännön yhteisvaikutus [13, s. 169].

Lähteissä [11][18][21] on esitetty, että umpipoikkileikkauksissa leikkauksen ja väännön yhteisvaikutuksen puristusmurtokestävyyttä voitaisiin arvioida kaavalla

$$\left( \frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} \right)^2 + \left( \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \right)^2 \leq 1. \quad (25)$$

Kaava (25) perustuu otaksumaan, että leikkausvoimasta aiheutuvat jännitykset pystyvät jakaantumaan uudelleen poikkileikkauksen keskialueelle, jossa plastisuusteorian mukaan laskettuna ei ole väännöstä aiheutuvia jännityksiä. Tätä otaksumaa on myös hyödynnetty tasojännitystilojen avulla laskettaessa [17, s. 333].

Puristusalueella puristusmurto voi tapahtua taivutuksesta, väännöstä ja normaalivoimasta sekä näiden yhteisvaikutuksesta. Pääpuristusjännitys on alaluvun 3.2 kaavan (27) mukaan suurempi silloin, kun yksiaksiaalisen puristusjännityksen ohella vaikuttaa väännöstä aiheutuva leikkausjännitys.

### 3.1.5 Puristusmurtokestävyyden arviointi

Erilaisia ratkaisutapoja puristusmurtokestävyyden arviointiin edellä mainituissa alueissa on monia. Jos tasojännitystila ei ole vakio puristus- tai sivualueella, esimerkiksi seuraavat tarkastelutavat ovat mahdollisia alueen puristusmurtokestävyyden arvioinnissa:

- i. tarkastelu vertaamalla kapasiteetin itseisarvoltaan pienintä arvoa määräävimpään pääpuristusjännitykseen
- ii. tarkastelu kestävyiden kannalta määräävimmissä pisteissä
- iii. tarkastelu jossakin määrätyssä pisteessä, esimerkiksi alueen keskipisteessä
- iv. tarkastelu jakamalla alue osa-alueisiin, joissa vaikuttaa vakio tasojännitystila
- v. tarkastelu koko alueen kokonaiskestävyyden mukaan

Ensimmäisen kohdan mukainen tarkastelu johtaa varmimmalla puolella olevaan tulokseen. Siinä kuitenkin jännitykset saattavat jäädä alhaiseksi verrattuna kapasiteettiin. Toinen kohta johtaa myös varmalla puolella olevaan tulokseen. Se ei kuitenkaan salli jännitysten uudelleen jakautumista sellaiselle alueen osalle, jossa on vielä kapasiteettia jäljellä.

Tällöin laskennallinen puristusmurto tapahtuu heti, kun jonkin alueen sisällä olevan pisteen jännitystila saavuttaa puristumurtokestävyyden. Tarkastelu kolmannen kohdan mukaisesti helpottaa laskentaa, mutta toisaalta kestävyys saattaa jossakin kohdassa aluetta ylittyä reilusti ja johtaa epävarmalla puolella olevaan tulokseen. Neljännen kohdan mukainen tarkastelu sallii jännitysten uudelleen jakautumisen osa-alueiden sisällä, jolloin osa-alueiden määrä vaikuttaa lopputulokseen. Viimeisimmän kohdan mukainen tarkastelu sallii jännitysten jakautumisen uudelleen sellaiselle alueen osalle, jossa on vielä kapasiteettia jäljellä. Jos jännitykset eivät todellisuudessa pysty jakautumaan uudelleen näin pitkälle, laskenta johtaa epävarmalla puolella olevaan tulokseen.

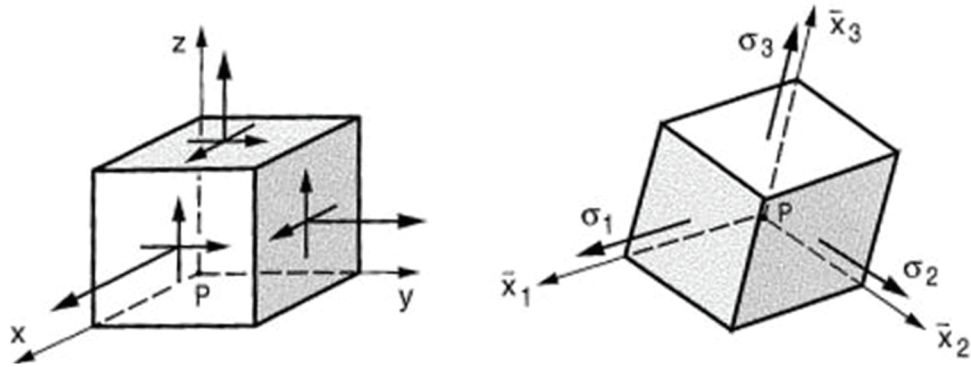
EN 1992-2 kohdassa 6.109 puristumurtokestävyyttä tarkastellaan ensimmäisen kohdan mukaan eli vertaamalla kapasiteetin itseisarvoltaan pienintä arvoa itseisarvoltaan suurimpaan puristusjännitykseen. Tällöin esimerkiksi sivupinnassa kapasiteetin arvo määritetään kohdassa, johon kohdistuu eniten vetoa, ja puristusjännityksen arvo kohdassa, jossa se on suurimmillaan.

Vuoden 2010 mallinormissa betonin osuutta leikkauskestävyydestä laskettaessa pituussuuntaisen venymän vaikutus huomioidaan sisäisen momenttivarren keskikohdassa olevan venymän arvolla [7, s. 367]. Jos tasojännitystilojen mukaista puristumurtokestävyyttä tarkasteltaisiin saman periaatteen mukaisesti, taivutuksen suunnan suhteen sivupintaa voitaisiin tarkastella yhtenä alueena, jossa vaikuttaa homogeeninen tasojännitystila.

Collinsin ja Rahalin mukaan [22, s. 159] sivupinnan keskikohdan venymää käytettäessä pituussuuntaisen venymän vaikutus ei tule huomioiduksi tarpeeksi tarkasti. He ovat käsitelleet julkaisussa [22] laskentaohjelmaa yhdistetyille taivutus- ja vääntörasituksille. Laskentaohjelma perustuu MCFT-laskentamenetelmään (*Modified Compression Field Theory*). Ohjelmassa pituussuuntainen venymä on huomioitu jakamalla tarkasteltava sivualue useampaan osa-alueeseen, joissa kussakin on käytetty kyseisen alueen mediaanivenymää. Osa-alueille on myös otaksuttu yksilöllinen puristusjännityksen suuntakulma sekä paksuus.

### 3.2 Halkeilematon homogeeninen tasojännityselementti

Pääjännityksistä selviää tarkasteltavaan pisteeseen kohdistuvat suurimmat ja pienimmät jännitykset sekä niiden suunnat. Pääjännityksiä vastaava jännityselementti saadaan kiertämällä koordinaatistoa origon ympäri sellaiseen asentoon, jossa jännityselementin tahkoissa ei esiinny leikkausjännityksiä. Alla olevassa kuvassa (*Kuva 20*) on esitetty jännityselementti ja sen pääjännitykset. Pääjännitykset ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden.



**Kuva 20.** Vasemmalla jännityselementti ja oikealla sitä vastaava pääjännityselementti [16, s. 306].

Tasojännitystilassa pääjännitykset  $\sigma_1$  ja  $\sigma_2$  saadaan laskettua kaavoista

$$\sigma_1 = \sigma_k + R \quad (26)$$

$$\sigma_2 = \sigma_k - R, \quad (27)$$

missä  $\sigma_k$  on normaalijännitysten keskiarvo ja  $R$  on amplitudi. Tasojännitystilassa 1. pääjännitys on pisteen suurin jännitys ja 2. pääjännitys on pisteen pienin jännitys. Normaalijännitysten keskiarvo lasketaan kaavalla

$$\sigma_k = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y). \quad (28)$$

Amplitudi lasketaan kaavalla

$$R = \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \tau_{xy}^2}. \quad [16, \text{s. 315–316}] \quad (29)$$

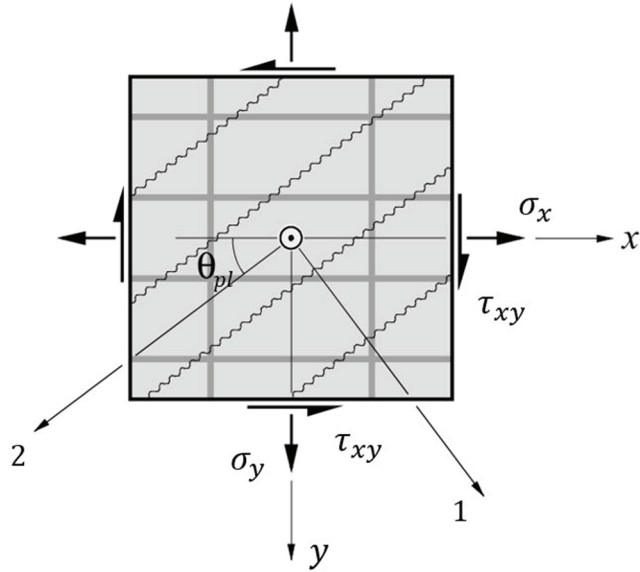
Suuremman pääjännityksen suuntakulma x-akselin suhteen eli 1. pääsuunta ( $\theta_1$ ) saadaan ratkaistua kaavasta

$$\tan \theta_1 = \frac{\tau_{xy}}{\sigma_1 - \sigma_y}. \quad (30)$$

Pienemmän pääjännityksen suuntakulma eli 2. pääsuunta ( $\theta_2$ ) on kohtisuorassa 1. pääsuuntaa vastaan. [19, s. 240]

### 3.3 Halkeillut teräsbetoninen tasojännityselementti

Halkeilleessa jännityselementissä pääjännityksiä ei voida ratkaista alaluvun 3.2 mukaisesti. Alla olevassa kuvassa (Kuva 21) on esitetty halkeilleen ja kohtisuorasti raudoitettun betonin tasojännityselementti.



**Kuva 21.** Halkeilleen tasojännityselementin merkinnät, missä koordinaattiakselit 1 ja 2 vastaavat halkeamien suuntaa ja  $\theta_{pl}$  on halkeamien sekä betonin pääpuristujännityksen suuntakulma x-akselista. Perustuu lähteeseen [23, s. 55].

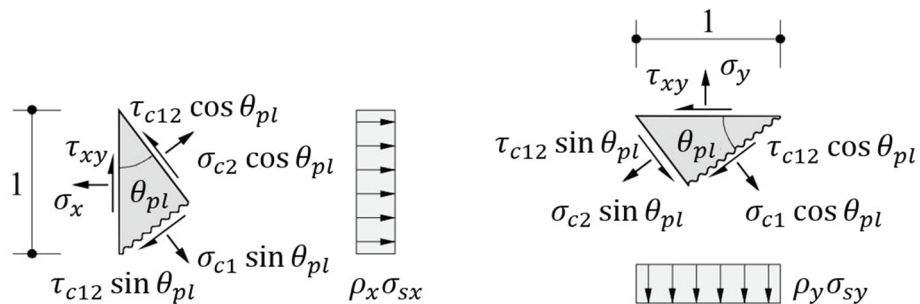
Kun rauditus on järjestetty x- ja y-suuntien mukaisesti ja raudituksen vaikutus betonin pinta-alaan sekä leikkausjännitykseen jätetään huomioimatta, teräsbetonin tasapainoehtoiksi saadaan

$$\sigma_x = \sigma_{cx} + \rho_x \sigma_{sx} \quad (31)$$

$$\sigma_y = \sigma_{cy} + \rho_y \sigma_{sy} \quad (32)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{cxy}, \quad (33)$$

missä  $\rho_x$  ja  $\rho_y$  ovat geometriset raudoitussuhteet x- ja y-suunnassa. [24, s. 222] Yllä esitetystä jännityselementistä (Kuva 21) voidaan muodostaa vapaakappalekuvat alla olevan kuvan (Kuva 22) mukaisesti.



**Kuva 22.** Halkeilleen jännityselementin vapaakappalekuvat halkeaman kohdalla. Perustuu lähteeseen [23, s. 55].

Yllä esitetyn kuvan (Kuva 22) ja kaavojen (31), (32) ja (33) avulla saadaan tasapainoehdot

$$\sigma_x = \rho_x \sigma_{sx} + \sigma_{c1} \sin^2 \theta_{pl} + \sigma_{c2} \cos^2 \theta_{pl} - \tau_{c12} \sin(2\theta_{pl}) \quad (34)$$

$$\sigma_y = \rho_y \sigma_{sy} + \sigma_{c1} \cos^2 \theta_{pl} + \sigma_{c2} \sin^2 \theta_{pl} - \tau_{c12} \sin(2\theta_{pl}) \quad (35)$$

$$\tau_{xy} = (\sigma_{c1} - \sigma_{c2}) \sin \theta_{pl} \cos \theta_{pl} - \tau_{c12} \cos(2\theta_{pl}), \quad (36)$$

missä  $\sigma_{c1}$  on betonin vetojännitys kohtisuorassa halkeamaan nähden,  $\sigma_{c2}$  on betonin puristusjännitys halkeaman suunnassa ja  $\tau_{c12}$  on betonin leikkausjännitys halkeaman suunnassa. Otaksutaan, että halkeamien tasossa ei ole jännityksiä, halkeamat pystyvät kääntymään ja halkeamat ovat kohtisuorassa suhteessa päävenymään. Tällöin halkeamassa vaikuttava betonin leikkausjännitys  $\tau_{c,cr} = \tau_{c12} = 0$ , betonin vetojännitys  $\sigma_{c1,cr} = \sigma_{c1} = 0$  sekä  $\sigma_{c2}$  on betonin pääpuristusjännitys ja sen suunta vastaa pääpuristuman suuntaa. [23, s. 66] Tasapainoehdot (34), (35) ja (36) tällöin yksinkertaistuvat muotoon

$$\sigma_x = \rho_x \sigma_{sx} + \sigma_{c2} \cos^2 \theta_{pl} \quad (37)$$

$$\sigma_y = \rho_y \sigma_{sy} + \sigma_{c2} \sin^2 \theta_{pl} \quad (38)$$

$$\tau_{xy} = -\sigma_{c2} \sin \theta_{pl} \cos \theta_{pl}. \quad (39)$$

Edellä esitetyistä tasapainoehdoista (37), (38) ja (39) voidaan ratkaista raudoituksen ja betonin jännitykset halkeaman kohdalla:

$$\sigma_{sx} = (\sigma_x + \tau_{xy} \cot \theta_{pl}) / \rho_x \quad (40)$$

$$\sigma_{sy} = (\sigma_y + \tau_{xy} \tan \theta_{pl}) / \rho_y \quad (41)$$

$$\sigma_{c2} = -\tau_{xy} / (\sin \theta_{pl} \cos \theta_{pl}) = -\tau_{xy} (\tan \theta_{pl} + \cot \theta_{pl}). \quad (42)$$

Jos  $\tau_{xy} = 0$ , betonin pääpuristusjännitys saadaan kaavasta  $\sigma_{c2} = \min(\sigma_x, \sigma_y)$ .

Collins ja Vecchio [24] sekä Kaufmann [23] ovat tutkimuksissaan huomioineet betonin vetojännityksen halkeamien välissä. Edellä esitetyt kaavat (40), (41) ja (42), jotka on muodostettu halkeaman kohdassa, pätevät jokaisessa halkeilleen jännityselementin kohdassa ainoastaan, jos betonin vetojännitykset oletetaan nolaksi myös halkeamien välissä. Jos betonin vetolujuus oletetaan suuremmaksi kuin nolla, betonin pääpuristusjännitys pienenee halkeamien välissä betonin päävetojännityksen kasvaessa [23, s. 67]. Näin ollen betonin vetojännitysten oletaminen nolaksi johtaa varmalla puolella olevaan tulokseen.

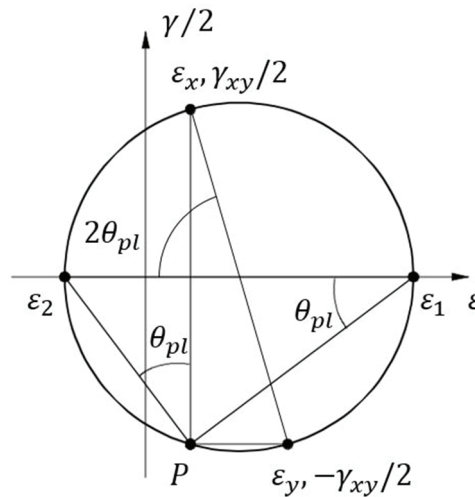
Kun betonin vetojännitys halkeamien välissä oletetaan nolaksi, tasojaännityselementin lineaari-kimmoiset venymät saadaan ratkaistua kaavoilla

$$\varepsilon_x = \sigma_{sx} / E_s \quad (43)$$

$$\varepsilon_y = \sigma_{sy} / E_s \quad (44)$$

$$\varepsilon_2 = \sigma_{c2} / E_c. \quad (45)$$





**Kuva 23.** Tasoelementin muodonmuutokset Mohrin ympyrän avulla esitettynä. Perustuu lähteeseen [23, s. 67].

Venymien ja suuntakulman  $\theta_{pl}$  välinen yhteys saadaan yllä esitetyn kuvan (Kuva 23) mukaan kaavasta

$$\cot^2 \theta_{pl} = \frac{\varepsilon_y - \varepsilon_2}{\varepsilon_x - \varepsilon_2}. \quad (46)$$

Vastaavasti yllä olevan kuvan (Kuva 23) mukaan päävenymä  $\varepsilon_1$  saadaan ratkaistua kaavalla

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x + \varepsilon_y - \varepsilon_2. \quad (47)$$

Jos materiaaleille käytetään lineaari-kimmoista muodonmuutosyhteyttä (kaavat (43), (44) ja (45)), suuntakulma, muodonmuutokset ja jännitykset voidaan ratkaista iteratiivisesti suuntakulman  $\theta_{pl}$  avulla. Jos materiaaleille käytetään esimerkiksi alaluvussa 2.1 esitetyjä elastis-plastisia jännitys-muodonmuutos-kuvioita, suuntakulma, muodonmuutokset ja jännitykset voidaan ratkaista iteratiivisesti muodonmuutosten  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  ja  $\varepsilon_2$  avulla.

### 3.4 Betonin puristuskestävyys tasojännitystilassa

Betonin puristuskestävyyttä tarkastellessa poikkileikkaus oletetaan halkeilleeksi [8, s. 51]. Halkeilleessa poikkileikkauksessa halkeamien normaalien suuntaiset vetojännitykset välitetään raudoituksen avulla. Fosterin ja Kaufmannin mukaan [25, s. 46] useat alan tutkijat ovat osoittaneet raudoituksen, johon kohdistuu vetoa, heikentävän betonin puristuslujuutta. On myös osoitettu, että betonin lujuuden kasvaessa puristusmurrosta tulee entistä hauraampi.

Edellä mainittujen asioiden takia betonin puristuslujuuden pieneneminen tulee ottaa huomioon tasojännitystilassa, jossa toinen pääjännityksistä on vetoa. Seuraavissa alaluvuissa

on esitetty tarkemmin vetojännityksien huomioimisesta laskennassa sekä vertailtu niiden vaikutuksia betonin puristuslujuuteen.

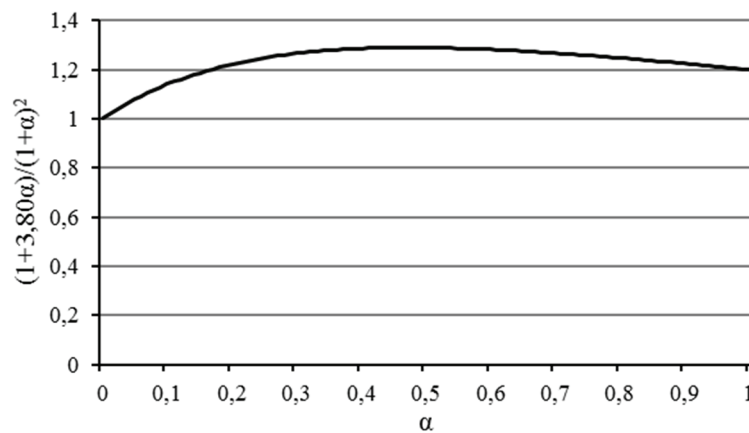
### 3.4.1 Puristuskestävyyden laskenta EN 1992-2 mukaan

Eurokoodin 1992-2 kohta 6.109 mahdollistaa poikittaisen venymän huomioonpuristuskestävyyden laskennassa. Eurokoodissa 1992-1-1 tämä ei toistaiseksi ole mahdollista. Lineaarisen elementtimenetelmän mukaan laskettuun tasojaännitystilaan perustuvassa mitoituksessa betonin puristuskestävyys ( $\sigma_{cd,max}$ ) määritellään pääjaännitysarvojen funktiona seuraavasti:

- i. Jos pääjaännitykset ovat kumpikin puristusjaännityksiä, betonin puristuskestävyys lasketaan kaavalla

$$\sigma_{cd,max} = -0,85f_{cd} \frac{1+3,80\alpha}{(1+\alpha)^2}, \quad (48)$$

jossa  $\alpha$  on kahden pääjaännityksen keskinäinen suhde, joka lasketaan jakamalla pienempi arvo suuremmalla. Suurin sallittu kestävyys saadaan, kun pääjaännitysten suhde on noin 0,47. Alla olevassa kuvassa (Kuva 24) on selvennetty pääjaännitysten suhteen vaikutusta kestävyYTEEN.



**Kuva 24.** Pääpuristusjaännitysten suhteen vaikutus betonin puristuskestävyyteen.

- ii. Jos toinen pääjaännityksistä on vetoa ja plastinen analyysi on suoritettu arvolla  $\theta = \theta_{el}$  eikä rauditus missään kohdassa myöä, betonin puristuskestävyys lasketaan kaavalla

$$\sigma_{cd,max} = -f_{cd} \left[ 0,85 - \frac{\sigma_s}{f_{yd}} (0,85 - \nu) \right], \quad (49)$$

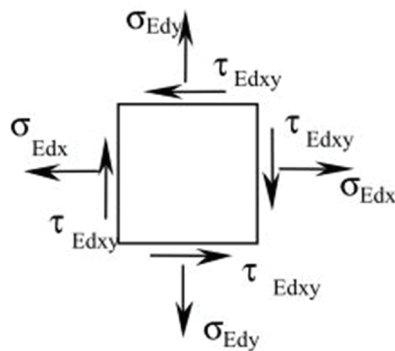
missä  $\sigma_s$  on raudoituksen suurin vetojännitys,  $f_{yd}$  on raudoituksen myötölujuuden mitoitusarvo,  $\nu$  on kaavan (6) mukainen arvo,  $\theta$  on plastisen puristuskentän kaltevuus x-akseliin nähden ja  $\theta_{el}$  on pääpuristusjännityksen kaltevuuskulma x-akseliin nähden kimmoteorian mukaisessa analyysissä. Kaavan (49) mukainen betonin puristuskestävyys on esitetty alaluvussa 3.4.3 (*Kuva 26*) päävenymän funktiona.

- iii. Jos raudoitus jossain kohti myötää ja plastinen analyysi on suoritettu, betonin puristuskestävyys lasketaan kaavalla

$$\sigma_{cd,max} = -\nu f_{cd}(1 - 0,032|\theta - \theta_{el}|), \quad (50)$$

jossa  $|\theta - \theta_{el}|$  saa olla enintään 15 astetta.

Edellä esitetyissä kaavoissa betonin puristuslujuuden mitoitusarvon laskennassa voidaan Hendyn ja Smithin mukaan [13, s. 217] käyttää arvoa  $\alpha_{cc} = 1,0$ , jolloin betonin yksiakselialinen puristuskestävyys on yhteneväinen betonin puristuslujuuden mitoitusarvon kanssa arvolla  $\alpha_{cc} = 0,85$ . Eurokoodissa 1992-2 ei kuitenkaan ole tästä mainintaa, joten puristuskestävyyden laskennassa (*Kuva 26*) käytetään suositusarvoa  $\alpha_{cc} = 0,85$ . Edellä esitetyt kaavat eivät mahdollista betonin puristuslujuuden pienennyskertoimen suurentamista, kun raudoitus ei myödy ja valittu plastisen puristuskentän kaltevuus eroaa kimmoteorian puristusjännityksen kulmasta. Tasojännityskomponenteissa käytetään alla esitetyn kuvan (*Kuva 25*) mukaisia merkkisääntöjä.



**Kuva 25.** Tasojännityskomponenttien merkkisäännöt [8, s. 31].

Eurokoodin 1992-2 liitteessä F esitetään kohdassa 6.109 esitettyjen kaavojen (48), (49) ja (50) lisäksi kaksiakselisessa jännitystilassa raudoituksen suunnitteluun ja betonin jännityksen laskemiseen tarvittavat kaavat, joita voidaan käyttää yhdessä edellä mainittujen kaavojen kanssa. Näiden kaavojen merkkisäännöt kuitenkin eroavat kaavoista (48), (49) ja (50) [13, s. 216]. Selvyyden ja yhteneväisyyden vuoksi seuraavat kaavat on esitetty

edellä mainittujen kaavojen merkkisääntöjen mukaisesti, jolloin molemmat ovat yllä olevan kuvan (*Kuva 25*) mukaisia. Raudoituksen sekä betonin puristusjännityksen mitoitusarvon ( $\sigma_{cd}$ ) tulee toteuttaa ehdot

$$\rho_x \sigma_{sx} = |\tau_{Edxy}| \cot \theta + \sigma_{Edx} \leq \rho_x f_{yd,x} \quad (51)$$

$$\rho_y \sigma_{sy} = |\tau_{Edxy}| \tan \theta + \sigma_{Edy} \leq \rho_y f_{yd,y} \quad (52)$$

$$\sigma_{cd} = -|\tau_{Edxy}| (\tan \theta + \cot \theta) \geq \sigma_{cd,max}, \quad (53)$$

missä  $\rho_i$ ,  $\sigma_{si}$  ja  $f_{yd,i}$  ovat geometrinen raudoitussuhde, raudoituksen jännitys ja raudoituksen myötölujuus x- tai y-suunnassa [13, s. 216]. Edellä esitetyt kaavat ovat lähes vastaavat kuin alaluvussa 3.3 esitetyt kaavat (40), (41) ja (42).

### 3.4.2 Puristuskestävyyden laskenta kohtisuoran venymän mukaan

Kun merkitään betonin pääpuristusjännitystä  $\sigma_{c2} = \sigma_{cd}$  murtorajatilassa, betonin pääpuristusjännityksen tulee toteuttaa ehto

$$\sigma_{cd} \geq \sigma_{cd,max}, \quad (54)$$

jossa betonin puristuskestävyys saadaan kaavasta

$$\sigma_{cd,max} = -\nu f_{cd}. \quad (55)$$

Betonin puristuskestävyyden pienennyskerroin ( $\nu$ ) kaksiakselisessa jännitystilassa saadaan kaavasta

$$\nu = \eta_{fc} \eta_{\varepsilon}, \quad (56)$$

jossa  $\eta_{fc}$  on betonin lujuuden huomioon ottava kerroin ja  $\eta_{\varepsilon}$  on poikittaisen venymän huomioon ottava kerroin. Lujuuden huomioiva kerroin saadaan laskettua kaavasta

$$\eta_{fc} = \left( \frac{30 \text{ MPa}}{f_{ck}} \right)^{\frac{1}{3}} \leq 1,0. \quad [7][26] \quad (57)$$

Collins ja Vecchio ovat esittäneet [24, s. 225] tehtyjen paneelitestien perusteella puristuskestävyyden pienennyskerroimeksi  $\nu$  kaksiakselisessa jännitystilassa kaavan (58) mukaista arvoa. Kaavaa on käytetty useissa ohjeissa, standardeissa, julkaisuissa ja tutkimuksissa [17][25–27]. Esitetyssä pienennyskerroimessa ei kuitenkaan ole huomioitu betonin lujuuden vaikutusta, joka olisi hyvä ottaa huomioon pienennyskerroimen arvossa [26, s. 607]. Näin ollen poikittaisen venymän huomioon ottava kerroin saadaan kaavasta

$$\eta_{\varepsilon} = \frac{1}{0,8+170\varepsilon_1} \leq 1,0, \quad (58)$$

jossa  $\varepsilon_1$  on päävenymä, joka on kohtisuorassa pääpuristusjännitystä vastaan. Kun päävenymä on 5 ‰, pienennyskerroimen arvoksi saadaan noin 0,6, joka vastaa suuruusluokaltaan kaavassa (6) esitettyä arvoa.

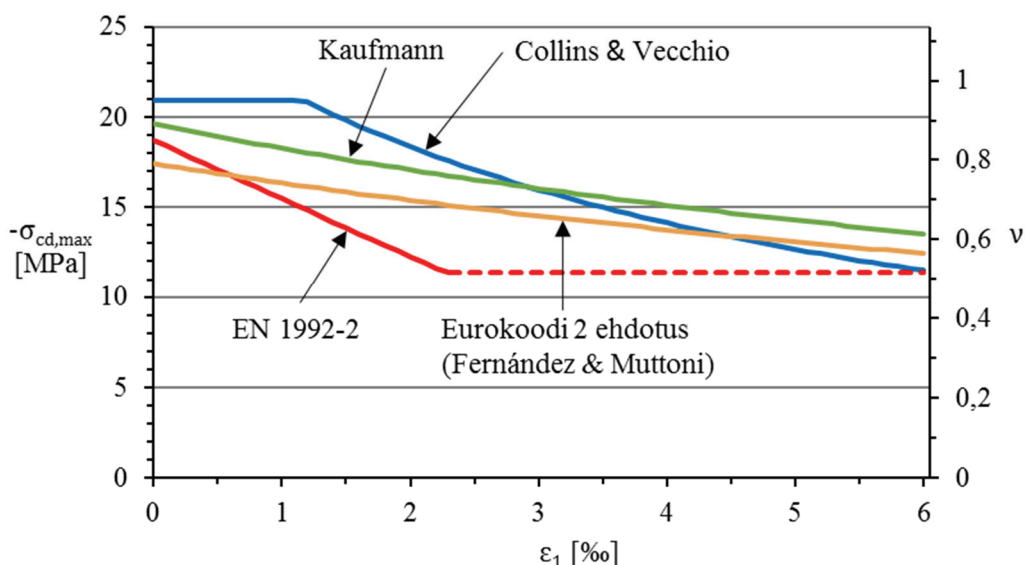
Kaufmann on esittänyt betonin puristuskestävyydeksi kaksiakσιαalisessa jännitystilassa kaavan (59) mukaista arvoa. Se on kalibroitu 78 puristumurtuneen koekappaleen avulla. Koekappaleista lähes kaikki on ollut paneelimaisia ja niihin on kohdistettu kaksiakσιαalinen jännitystila. Kaufmannin esittämä betonin puristuskestävyys saadaan kaavasta

$$\sigma_{cd,max} = \frac{(f_{cd}/MPa)^{2/3}}{0,4+30\varepsilon_1} MPa \leq f_{cd}. \quad (59)$$

Eurokoodin kehitysryhmästä saadun alustavan tuloksen [Fernández & Muttoni] mukainen poikittaisen venymän huomioon ottava pienennyskerroin on esitetty seuraavassa alaluvussa 3.4.3 (*Kuva 26*). Eurokoodi 1992-1-1 ei nykytilassaan mahdollista poikittaisten venymien huomioon ottamista betonin puristuskestävyydessä. Eurokoodi 1992-2 mahdollistaa sen epäsuorasti kohdan 6.109 avulla, joka on tässä työssä esitetty alaluvussa 3.4.1.

### 3.4.3 Puristuskestävyyksien vertailua

Alla olevassa kuvaajassa (*Kuva 26*) on esitetty betonin puristuskestävyyden mitoitusarvo kohtisuoran päävenymän  $\varepsilon_1$  funktiona, kun betonin lujuusluokka on C35/45 ja materiaalien osavarmuusluvut ovat pienennetyt (1,35 betonille ja 1,1 betoniteräkselle). Tarkasteluun on otettu nykyisen eurokoodin 1992-2 kohdan 6.109 mukainen puristuskestävyys tasojännitystilassa (kaavat (49) ja (50)), missä on oletettu raudituksen olevan päävenymän suuntainen ja sen myötölujuuden ominaisarvona on käytetty arvoa 500 MPa. Lisäksi tarkastelussa on Collinsin ja Vecchion esittämä puristuskestävyys tasojännitystilassa betonin lujuuden vaikutus huomioiden (kaavat (55), (56), (57) ja (58)), Kaufmannin ehdottama puristuskestävyys (kaava (59)) sekä eurokoodin kehitysryhmän alustavan tuloksen mukainen puristuskestävyys. Tarkastelusta on jätetty pois kaksiakσιαalinen jännitystila, jossa molemmat pääjännitykset ovat puristusta, sillä sen tarkastelu ei ole oleellista laattapalkkipoikkileikkauksen mitoituksessa.



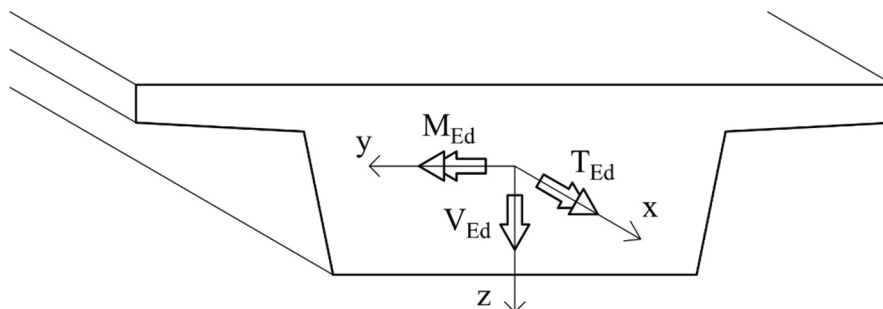
**Kuva 26.** Betonin (C35/45) puristuskestävyys ja pienennyskerroin kohtisuoran venymän funktiona.

Kuvaajasta (Kuva 26) nähdään, että eurokoodin 1992-2 mukaisessa mitoituksessa puristuskestävyys pienenee lineaarisesti poikittaisen venymän suhteen raudoituksen myötövenymän mitoitusarvoon (2,3 ‰) asti, jonka jälkeen se pysyy vakiona. Siinä kuitenkin tulee ottaa huomioon, että raudoituksen jännitys on laskettu päävenymän suuntaiselle raudoitukselle. Jos raudoitus ei ole päävenymän suuntainen, sen venymät ovat pienempiä kuin päävenymä. Tällöin raudoituksen myötäessä päävenymän arvo on suurempi kuin yllä olevassa kuvaajassa (Kuva 26). Eurokoodin ehdotuksessa puristuskestävyyden itseisarvo lähes nollan arvoisella päävenymällä on huomattavasti pienempi kuin puristuslujuuden mitoitusarvo  $f_{cd}$ , jonka arvo on lujuusluokan C35/45 betonilla 22 MPa. Collinsin ja Vecchion esittämän kaavan (58) mukaisessa mitoituksessa kohtisuorat venymät alkavat pienentää puristuslujuutta vasta päävenymän arvolla, joka vastaa noin puolta raudoituksen myötövenymästä.

Kaikilla kaavoilla päävenymän saavuttaessa arvon 5 ‰, joka vastaa päävenymän suuntaisen raudoituksen kaksinkertaista myötövenymää, puristuskestävyyden mitoitusarvo on noin 60 % puristuslujuuden mitoitusarvosta  $f_{cd}$ . Näistä kaavoista on hyvä erottaa yleisesti puristussauvan kestävyys määrittämisen yhteydessä käytetty kaavan (6) mukainen pienennyskerroin, jonka arvo on yleensä suuruusluokaltaan 0,5–0,6 riippuen betonin puristuslujuudesta. Suuruudeltaan vakion pienennyskerroimen käyttö on tilanteessa, jossa raudoitus ei myödy, varmalla puolella oleva oletus, joka myös helpottaa ja nopeuttaa suunnittelijan työtä.

## 4. LAATTAPALKIN PURISTUSMURTOKESTÄVYYDEN TARKASTELU

Laattapalkkipoikkileikkauksen puristusmurtokestävyyttä tarkastellaan murtorajatilassa. Alla olevassa kuvassa (Kuva 27) on esitetty globaali xyz-koordinaatisto ja poikkileikkaukseen kohdistuvat ulkoiset rasitukset.



**Kuva 27.** Poikkileikkauksen koordinaatisto ja ulkoiset rasitukset.

Tarkasteltavina pintoina on palkin sivupinta ja puristuspinna. Tarkasteltavaksi sivupinnaksi valitaan se sivupinta, jossa leikkausvoimasta ja vääntömomentista aiheutuvat tasojännitystilat ovat samansuuntaiset. Tarkasteltavaksi puristuspinna valitaan palkin ylä- ja alapinnasta se pinta, jossa taivutusmomentista ja jännevoimasta aiheutuva puristusjännitys on suurempi.

Tasojännitystilojen mukaisen laskennan lisäksi puristusmurtokestävyys lasketaan myös ristikkoanalogialla EN 1992-2:n ja NCCI 2:n mukaisesti. EN 1992-2 mukainen laskenta on esitetty alaluvussa 2.3 ja NCCI 2:n mukainen laskenta on esitetty alaluvussa 2.4. EN 1992-2 mukaisessa laskennassa väännön tehollisen kotelopoikkileikkauksen seinämän paksuutena käytetään arvoa  $0,45A/u$ , josta on kerrottu lisää alaluvussa 2.5.

NCCI 2:ssa vääntömomentin ja leikkausvoiman yhteisvaikutusehto (kaava (12)) vastaa sivupinnan puristusmurtokestävyyttä sekä vääntö- ja taivutusmomentin yhteisvaikutusehto (kaava (13)) vastaa puristuspinnan puristusmurtokestävyyttä. EN 1992-2:n vääntömomentin ja leikkausvoiman yhteisvaikutusehto on esitetty kaavassa (7) ja se myös vastaa sivupinnan puristusmurtokestävyyttä. EN 1992-2:ssa ei ole esitetty ristikkoanalogian mukaista vääntö- ja taivutusmomentin yhteisvaikutusta puristuspinnaalle.

### 4.1 Tasojännitystilan mukaisen laskennan periaatteet ja otaksumat

Betonille käytetään kaavan (3) mukaista jännitys-muodonmuutos-kuviota (Kuva 1) ja betonin vetolujuus otaksutaan nolllaksi. Betoni- ja jänneteräkselle käytetään bilineaarista

jännitys-muodonmuutos-kuviota (*Kuva 3 ja Kuva 4*). Poikkeustilanteissa, joissa betoniteräksen kapasiteetti ei riitä tarkasteltavassa kohdassa, betoniteräkselle käytetään paikallisesti lineaarista jännitys-muodonmuutos-kuviota ( $\sigma_s = E_s \varepsilon_s$ ).

#### 4.1.1 Rasituksista aiheutuvat tasojännitystilat

Taivutuksesta ja normaalivoimasta aiheutuvat pituussuuntaiset normaalijännitykset lasketaan lineaarisen muodonmuutoskuvion avulla. Palkin normaalijännitysten laskennassa laatan toimiva leveys ( $b_{eff}$ ) huomioidaan NCCI 2:n mukaisesti. Lisäksi huomioidaan ylä- ja alapinnan pituussuuntaisten terästen vaikutus. Väännön ja leikkauksen vaikutusta taivutusmuodonmuutokseen ei huomioida.

Väännöstä aiheutuva leikkausjännitys lasketaan plastisuusteorian mukaan kaavalla (24). Leikkausjännitysten otaksutaan jakaantuvan vain palkille eli laippojen vaikutusta ei huomioida. Tehollisen kotelopoikkileikkauksen seinämäpaksuus  $t_{ef}$  lasketaan NCCI 2:n mukaisesti. Sen laskenta on esitetty alaluvussa 2.4. NCCI 2:n mukainen seinämäpaksuus on valittu laskentaan siksi, että NCCI 2:n ja tasojännitystilojen mukaisen laskennan tulokset säilyvät vertailukelpoisina. Tällöin taivutusmomentilla ei ole paikallista vaikutusta esimerkiksi seinämän paksuuteen.

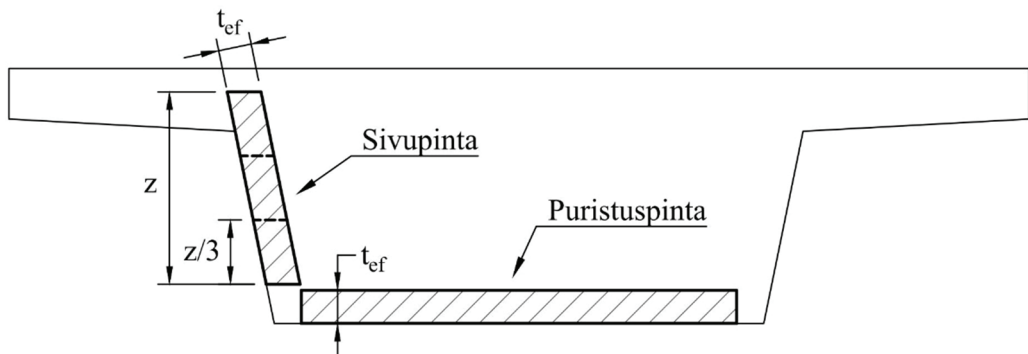
Leikkausvoimasta aiheutuva leikkausjännitys lasketaan plastisuusteorian mukaan kaavalla (21), jossa palkin uuman leveydeksi  $b_w$  otaksutaan palkin pienin leveys, ja sisäinen momenttivarsi  $z$  lasketaan vuoden 2010 mallinormin mukaisesti kaavalla (22) siten, että puristusresultantin korkeus on taivutuskapasiteetin mukainen. Valitsemalla uuman leveydeksi sen pienin leveys leikkausjännitys on vakio sisäisen momenttivarren korkeudella ja se on myös varmallalla puolella. Leikkausjännityksen otaksutaan jakaantuvan vain sisäisen momenttivarren korkeudelle.

Taivutusmomentin mukainen sisäisen momenttivarren laskenta jännitetyillä rakenteilla tuen ja kentän välisellä alueella johtaisi useissa tapauksissa lähes nollan arvoiseen momenttivarteeseen, sillä käytetyllä betonin jännitys-muodonmuutos-kuviolla ja pienillä taivutusmomentin arvoilla betonin puristusresultantti ja terästen vetoresultantti sijaitsisivat poikkileikkauksen keskialueella lähellä toisiaan. Käytetyllä betonin jännitys-muodonmuutos-kuviolla sekä taivutusmomentin että taivutuskapasiteetin mukainen sisäisen momenttivarren laskenta johtaa pienempiin tuloksiin verrattuna yleisesti käytettyyn yksinkertaistettuun betonin suorakaidejännitys-malliin, jossa betonin jännitys on  $f_{cd}$  (*Kuva 16*). Sisäinen momenttivarsi lasketaan vuoden 2010 mallinormissa jänne- ja betoniterästen vetoresultanttien sijasta niiden pinta-alojen avulla, mikä saattaisi kuvastaa leikkauksesta aiheutuvan lisävetovoiman jakaantumista paremmin kuin laskenta taivutuksessa olevan vetovoiman resultantin mukaan.



#### 4.1.2 Tasojännitystilojen tarkastelu

Puristuspinnaassa puristumurtoa tarkastellaan tehollisen kotelopoikkileikkauksen seinämän korkeudella. Sivupinnaassa puristumurtoa tarkastellaan sisäisen momenttivarren korkeudella ja myös tehollisen seinämän sisällä. Vääntömomentista ja leikkausvoimasta aiheutuvien leikkausjännitysten tasoelementit otaksutaan yhdensuuntaisiksi, jolloin leikkausjännitykset voidaan summata yhteen. Molemmissa tarkasteltavissa pinnoissa tasojännitystilat ovat palkin leveyssuunnassa vakiot. Alla olevassa kuvassa on esitetty tarkasteltavat alueet, kun alapinta on puristettu ja vasemmassa sivupinnassa väännön ja leikkauksen aiheuttamat leikkausjännitykset ovat samansuuntaiset.



**Kuva 28.** Tarkasteltavat alueet, kun alapinta on puristettu ja vasemmassa sivupinnassa vääntömomentin ja leikkausvoiman aiheuttamat leikkausjännitykset ovat samansuuntaiset.

Tarkasteltava sivupinta on jaettu kolmeen lohkokoon, joiden sisällä pääpuristusjännitykset voivat jakaantua uudelleen. Lohkojen määrä on valittu sillä perusteella, että taivutusmomentista johtuvat normaalijännitykset ovat näissä lohkoissa erilaiset, mutta toisaalta myös pääjännitykset pystyvät osin jakaantumaan uudelleen. Myös puristuspinnan sisällä pääpuristusjännitykset voivat jakaantua uudelleen. Puristuspinnaalle ei otaksuta vaikuttavan leikkausvoimasta johtuvia jännityksiä.

Jännitysten uudelleen jakautuminen tarkasteltavien alueiden sisällä on otettu huomioon yksinkertaistetusti integraalilla. Puristuspinnan tai sivupinnan lohkon puristumurtokestävyyden käyttöaste ( $ka$ ) on laskettu kaavalla

$$ka = \frac{\int_{z_{ap}}^{z_{yp}} \sigma_{cd}(z) dz}{\int_{z_{ap}}^{z_{yp}} \sigma_{cd,max}(z) dz}, \quad (60)$$

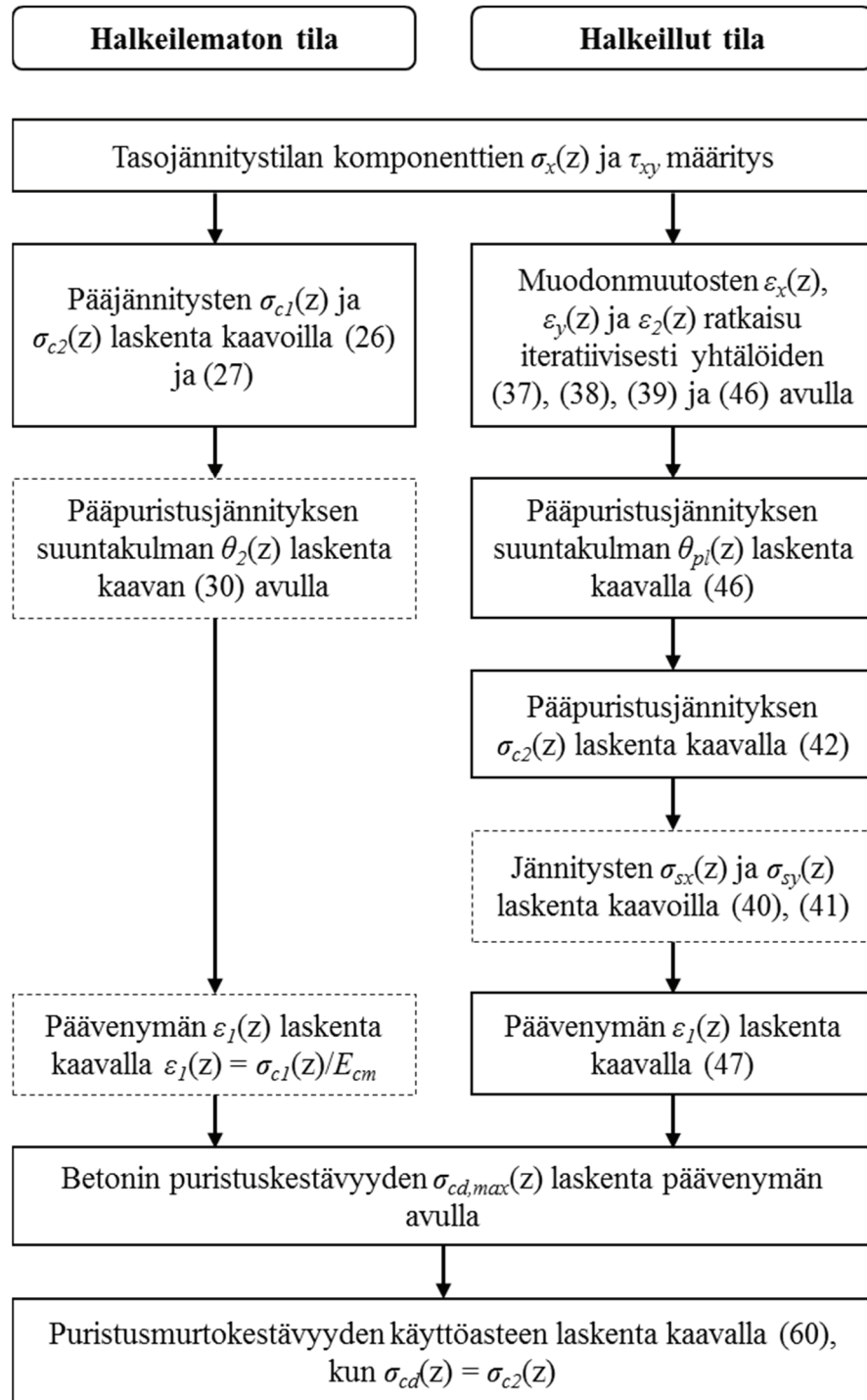
jossa  $z_{yp}$  ja  $z_{ap}$  on tarkasteltavan puristusalueen tai lohkon ylä- ja alaraja sekä betonin pääpuristusjännitys ja -kestävyys annetaan korkeuden funktiona. Sivupinnan puristumurtokestävyyden käyttöaste on suurin kaikkien sivupinnan lohkojen käyttöasteesta.

Tukien alueella poikkileikkauksiin kohdistuu korkeussuuntaista puristusjännitystä. Puristuspinna ei siis tällöin ole puhtaassa tasojännitystilassa. Korkeussuuntainen puristusjännitys kasvattaa paikallisesti betonin pituussuuntaista puristuskestävyyttä puristuspinna. Tukireaktion aiheuttamien puristusjännitysten ohella puristuspinna tai sen yläpuolella saattaa esiintyä poikittaissuuntaisia vetovoimia, jotka heikentävät sillan pituussuuntaista puristuskestävyyttä. Tukireaktioiden vaikutusta ei ole tässä työssä otettu huomioon.

### 4.1.3 Puristusmurtokestävyyden laskenta

Sivupinta otaksutaan tässä aina halkeilleeksi. Puristuspinna lasketaan sekä halkeilleena että halkeilemattomana. Halkeilukestävyyttä ja halkeamien määrää on vaikea todentaa puristuspinna, sillä väännöstä aiheutuvat leikkausjännitykset jakautuvat uudelleen kimmoteorian mukaisesta mallista plastisuusteorian mukaiseen malliin halkeiluasteen edetessä. Sen takia halkeilemattoman tilan väännöstä aiheutuvat jännitykset lasketaan myös plastisuusteorian mukaisella mallilla (tehollinen kotelopoikkileikkaus), jolloin samalla myös säilytetään vertailukelpoisuus sekä halkeilleen tilan että NCCI 2:n kanssa.

Tarkasteltavien pintojen geometrinen raudoitussuhde saadaan määritettyä kaavalla  $\rho = A_s/t_{ef}$ , jossa  $A_s$  on raudoituksen pinta-ala pituusyksikköä kohden. Halkeilemattomassa tilassa raudoituksen vaikutusta ei oteta huomioon betonin pääjännityksiä laskettaessa. Betonin päävenymä on halkeilemattomassa tilassa tarkasteltavilla rasituksilla hyvin pieni ( $< 0,5 \text{ ‰}$ ), joten sen vaikutus pienennyskertoimeen on vähäinen. Alla olevassa prosessikaaviossa (Kuva 29) on esitetty puristusmurtokestävyyden käyttöasteen laskennan kulku halkeilemattomassa ja halkeilleessa tilassa. Kaavion jännitykset on esitetty puristus- ja sivupinnan paikallisissa  $xy$ -koordinaatistoissa, joissa  $x$ - ja  $y$ -akselit ovat tarkasteltavan pinnan tason suuntaisia sekä  $x$ -akseli on sillan pituussuuntainen ja  $y$ -akseli on kohtisuorassa  $x$ -akseliin nähden. Katkoviivalla merkityt vaiheet eivät ole välttämättömiä laskennan kannalta, mutta niiden avulla saadaan lisää tietoa tai tarkkuutta laskentaan.



**Kuva 29.** Prosessikaavio puristumurtokestävyyden käyttöasteen laskennasta sekä halkeilemattomassa että halkeilleessa tilassa. Katkoviivalla merkityt kohdat eivät ole välttämättömiä laskennan kannalta.

Puristumurtokestävyyden  $\sigma_{cd,max}$  laskenta on tehty tässä työssä sekä Collinsin ja Vecchion mukaan kaavoilla (55), (56), (57) ja (58) sekä Kaufmannin mukaan kaavalla (59). Collinsin ja Vecchion mukaiseen laskentaan on lisätty betonin haurauden vaikutus kaavalla (57), jota heidän alkuperäisessä kaavassa ei ollut.

#### 4.1.4 Laskennan erot standardiin EN 1992-2 verrattuna

Standardissa EN 1992-2 kohta 6.109 ja liite F mahdollistavat tasojännitystiloihin perustuvan puristusmurtokestävyyden laskennan halkeilleessa tilassa. Kohdassa 6.109 tasojännityskomponentit tulisi määrittää lineaarisen elementtimenetelmän mukaan. Jos raudoitus ei myöä, puristusjännityksen suuntakulma tulisi olla myös lineaarisen elementtimenetelmän mukainen eli käytännössä halkeilemattoman tilan mukainen. Liitteen F mukaisessa laskennassa betonin puristuskestävyys tulee tarkistaa kohdan 6.109 mukaan, mikä johtaa siihen, että kohdan 6.109 rajoitukset koskevat myös liitettä F. Liitteessä F ei muuten ole annettu vastaavanlaisia rajoituksia tasojännityskomponenttien tai puristusjännityksen suuntakulman määrittämiseen. Suuntakulman tulisi kuitenkin olla sellainen, että raudoituksessa ei esiinny puristusta.

Tasojännityskomponenttien määrittämisen ja puristusjännityksen suuntakulman eroavaisuuksien lisäksi standardissa EN 1992-2 ja tämän työn mukaisessa halkeilleen tilan laskennassa on muitakin eroavaisuuksia. Kohdassa 6.109 puristuskestävyys määritetään raudoituksen suurimman jännityksen avulla. Lisäksi eurokoodi ei salli pääjännitysten uudelleen jakautumista.

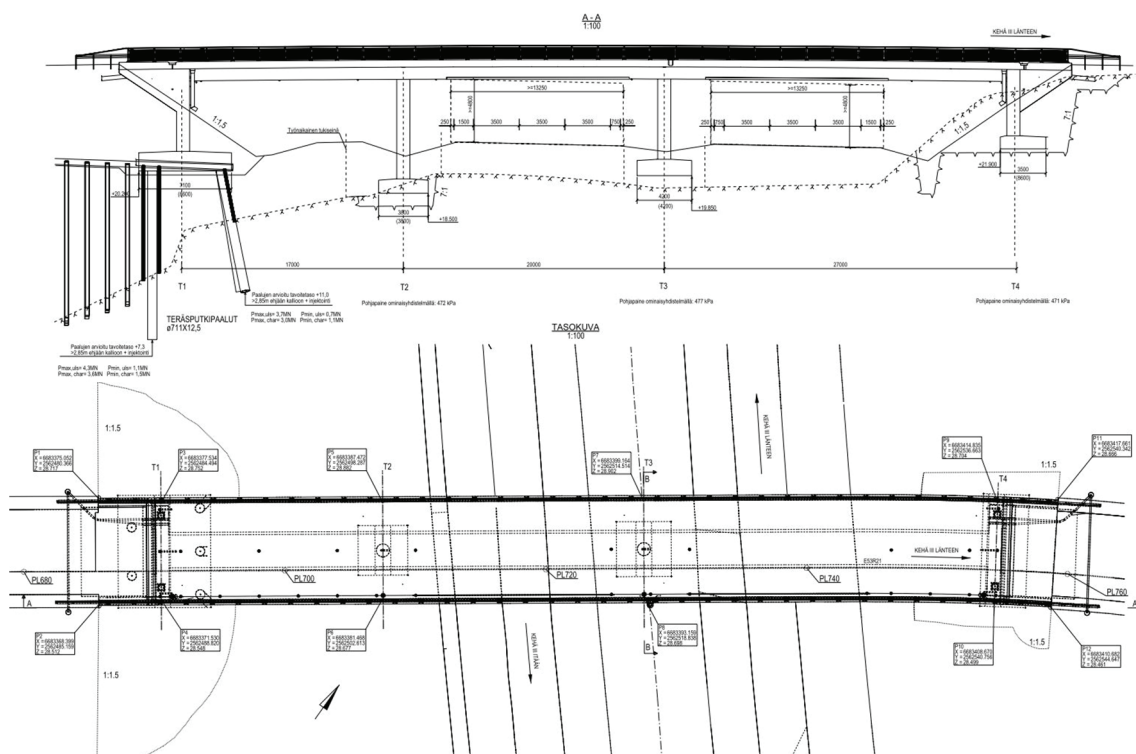
Tässä työssä käytettävän halkeilleen tilan laskennan erot ovat siis varsin laajat verrattuna standardiin EN-1992-2. Jos liitteessä F betonin puristuskestävyys voitaisiin laskea ilman kohdan 6.109 rajoituksia, tämän työn laskenta olisi eurokoodin mukainen lukuun ottamatta puristuskestävyyden määrittystä ja pääjännitysten osittaista uudelleen jakautumista. Lisäksi tämän työn mukaisessa laskennassa ei ole raudoituksen jännityksen rajoitusehtoja. Kun puristusmurtokestävyys lasketaan tasojännitystilojen avulla, myös raudoitus tulisi määrittää tai tarkastaa vastaavasti.

## 4.2 Tarkasteltavat poikkileikkaukset

Tässä luvussa on esitetty tutkittavat siltakohteet niistä saatavana olleiden piirustusten ja rakennelaskelmien [2][3] perusteella. Tutkittavia kohteita oli kaksi, joista molemmat ovat jännitettyjä jatkuvia palkkisiltoja. Siltakohteiden valinta perustui siihen, että niiden NCCI 2:n mukaisten puristusmurtokestävyyden yhteisvaikutuskaavojen käyttöaste oli korkea. Lisäksi valinnassa pyrittiin siihen, että tarkasteltavien siltakohteiden poikkileikkaukset eroaisivat toisistaan riittävästi sekä dimensioiltaan että palkkien rasituksiltaan, mutta kuitenkin edustaisivat tyypillisiä Suomessa olevia siltapoikkileikkauksia. Ensimmäiseksi kohteeksi valikoitui Vantaalla sijaitseva Västersundomin risteyssilta C ja toiseksi Äänekoskelle tuleva Tärttämäen silta. Tärttämäen silta on ollut tämän työn aikana vielä suunnitteluvaiheessa. Molemmista silloista valittiin useampi poikkileikkaus tarkastelua varten.

### 4.2.1 Västersundomin risteyssilta C

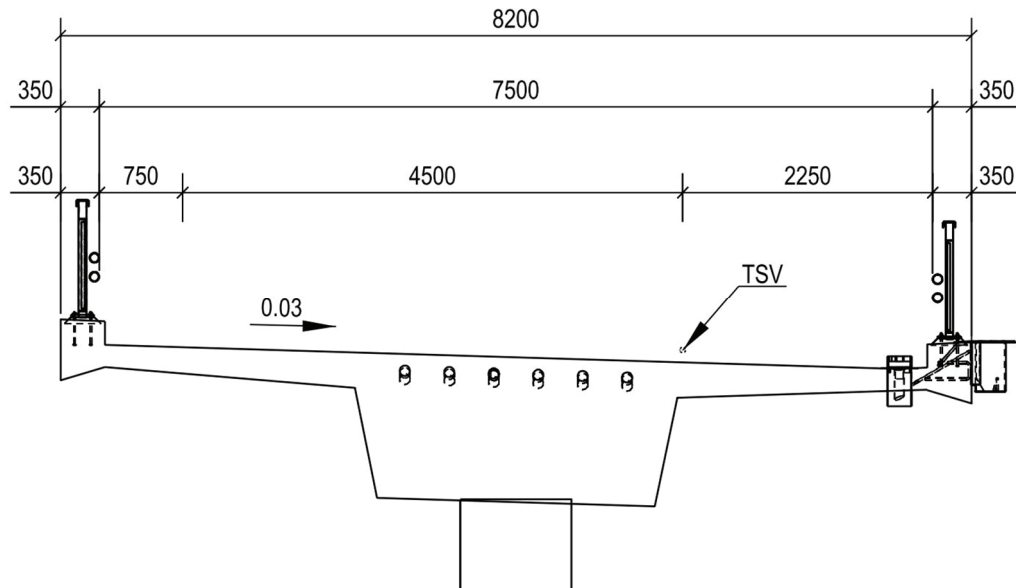
Västersundomin risteyssilta C on tyypillinen Suomessa oleva risteyssilta. Se on jännitetty, yksipalkkinen ja kolmiaukkoinen sekä sen palkki on suhteellisen matala ja leveä. Sillan jännemitat ovat 17,0+20,0+27,0 ja hyödyllinen leveys on 7,5 m. Alla olevassa kuvassa (Kuva 30) on esitetty sillan sivu- ja tasokuva yleispiirustuksesta.



**Kuva 30.** Västersundomin risteyssillan C sivu- ja tasokuva [2].

Sillan vaakageometria on pääosin suora. Tuen T4 päässä on lievästi kaareva osuus. Sillan molemmilla päätyilla on kaksi kalottilaakeria, jotka sallivat sillan pituussuuntaiset liikkeet. Päätytukien laakereista vain toiset sallivat poikittaissuuntaisen liikkeen. Välituilla ei ole laakereita. Sillan tuki T1 on perustettu kallioon tukeutuvilla paaluilla. Tuet T2 ja T4 on perustettu arinakerroksen välityksellä louhitun kallion varaan. Tuki T3 on perustettu kallioon ulottuvan massanvaihdon varaan.

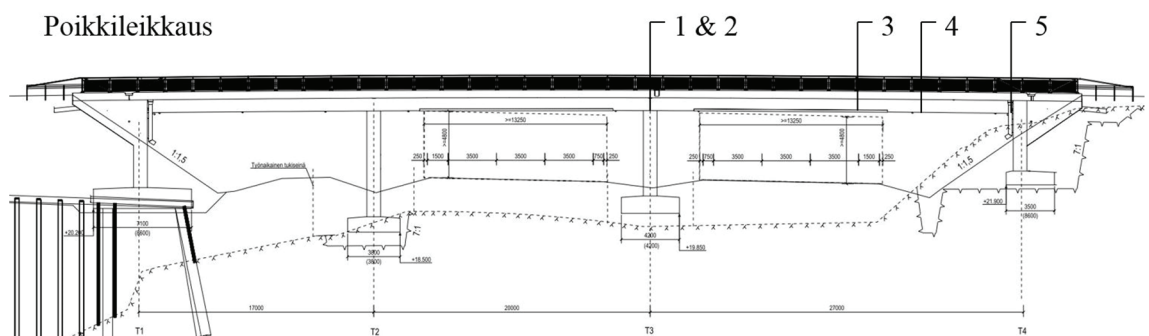
Sillan palkin korkeus on 1,3 m ja alapinnan leveys 2,5 m. Poikkileikkaus on kallistettu 3 % sillan sivusuunnassa. Tämän työn laskelmissa, kuten alkuperäisissäkin laskelmissa, poikkileikkaus on otaksuttu vaakasuoraksi sillan sivusuunnassa. Alla olevassa kuvassa (Kuva 31) on esitetty sillan poikkileikkaus yleispiirustuksesta.



**Kuva 31.** Västersundomin risteyssillan C poikkileikkaus [2].

Sillan betonin lujuusluokka on C35/45-3. Nimellinen betonipeite on palkkien kyljissä 45 mm ja muuten 40 mm. Sillassa on kuusi jännettä, jotka sijaitsevat samassa korkeustasossa toistensa suhteen. Jänteiden yhteenlaskettu pinta-ala on  $13500 \text{ mm}^2$  ja punostyyppi on Y1860S7.

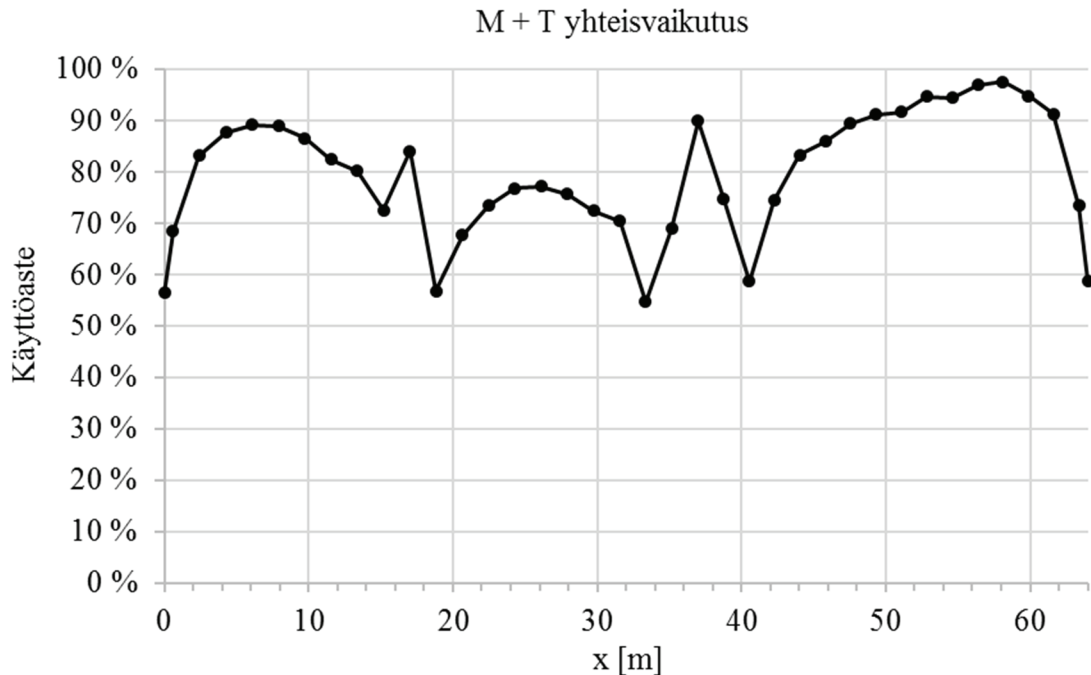
Sillasta valittiin 5 poikkileikkausta tarkastelua varten. Poikkileikkausten valinnan perusteena oli NCCI 2:n mukaisen puristus- tai sivupinnan puristumurron yhteisvaikutuksen suuri käyttöaste sekä valittuihin poikkileikkauksiin nähden erilaiset rasitustilat. Lisäksi poikkileikkausten valinta tehtiin sillä perusteella, että tarkasteluun saataisiin poikkileikkauksia tuki- ja kenttäalueelta sekä niiden väliseltä alueelta. Alla olevassa kuvassa (Kuva 32) on esitetty tarkasteltavien poikkileikkausten sijainti ja poikkileikkauksista käytettävät numerot sillan sivukuvassa. Tarkasteltavien poikkileikkausten dimensioid, rasitukset ja lasketut kapasiteetit on esitetty liitteessä A.



**Kuva 32.** Västersundomin sillan tarkasteltavat poikkileikkaukset. Perustuu lähteeseen [2].

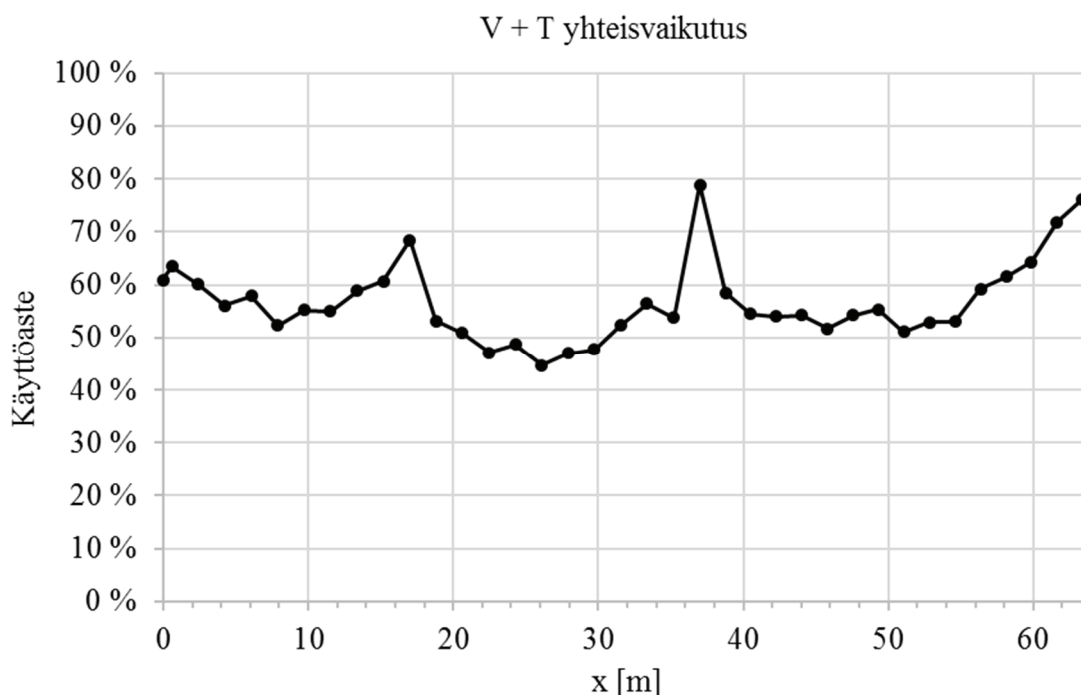
Tarkasteltavat poikkileikkaukset 1 ja 2 sijaitsevat samassa kohdassa, mutta niihin vaikuttaa erilainen rasitustila. Poikkileikkaukset 1, 3 ja 4 on valittu tarkasteluun korkean NCCI

2:n mukaisen puristuspinnan puristumurtokestävyyden käyttöasteen perusteella. Vastavasti poikkileikkaukset 2 ja 5 on valittu tarkasteluun korkean NCCI 2:n sivupinnan puristumurtokestävyyden käyttöasteen perusteella. Alla olevassa kuvassa (*Kuva 33*) on esitetty puristuspinnan puristumurtokestävyyden käyttöasteet sillan pituussuuntaisen akselin (x) funktiona sillan rakennelaskelmien mukaisesti. Tarkasteltavien poikkileikkauksien pyöristetyt x-arvot ovat poikkileikkausten numerojärjestyksessä 37, 37, 53, 58, 63.



**Kuva 33.** Puristuspinnan puristumurron yhteisvaikutuskestävyyden käyttöasteet rakennelaskelmien mukaisesti. Perustuu lähteeseen [2].

Tuella T3 puristuspinnassa saavutetaan 90 % käyttöaste. Tukien T3 ja T4 välisessä kentässä käyttöaste on suurimmillaan 98 %. Alla olevassa kuvassa (*Kuva 34*) on esitetty sivupinnan puristumurtokestävyyden käyttöasteet sillan pituussuuntaisen akselin (x) funktiona sillan rakennelaskelmien mukaisesti.



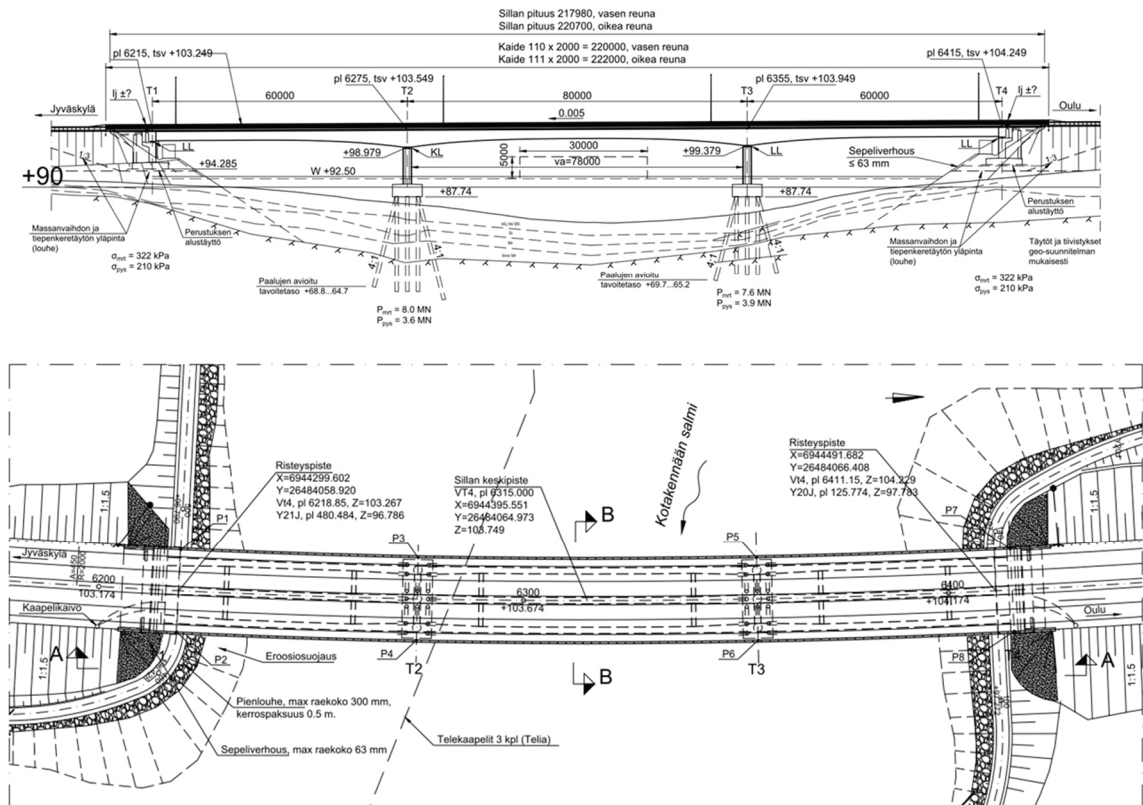
**Kuva 34.** Sivupinnan puristusmurron yhteisvaikutuskestävyyden käyttöasteet rakennelaskelmien mukaisesti. Perustuu lähteeseen [2]

Sivupinnan käyttöasteet ovat lähes kaikkialla pienemmät kuin puristuspinnoissa. Sivupinnan suurin käyttöaste saavutetaan tuella T3, ja sen arvo on 79 %.

#### 4.2.2 Tärttämäen silta

Tärttämäen silta on ollut tätä työtä tehdessä vielä suunnitteluvaiheessa. Silta on jännitetty, kolmipalkkinen ja kolmiaukkoinen sekä sen palkit ovat suhteellisen korkeita ja kapeita. Sillan palkkien korkeus on muuttuva. Palkkeja on myös levennetty tukialueilla. Sillan jännemitat ovat 60,0+80,0+60,0 ja hyödyllinen leveys on 19,5 m. Alla olevassa kuvassa (Kuva 35) on esitetty sillan sivu- ja tasokuva alustavasta yleispiirustuksesta.

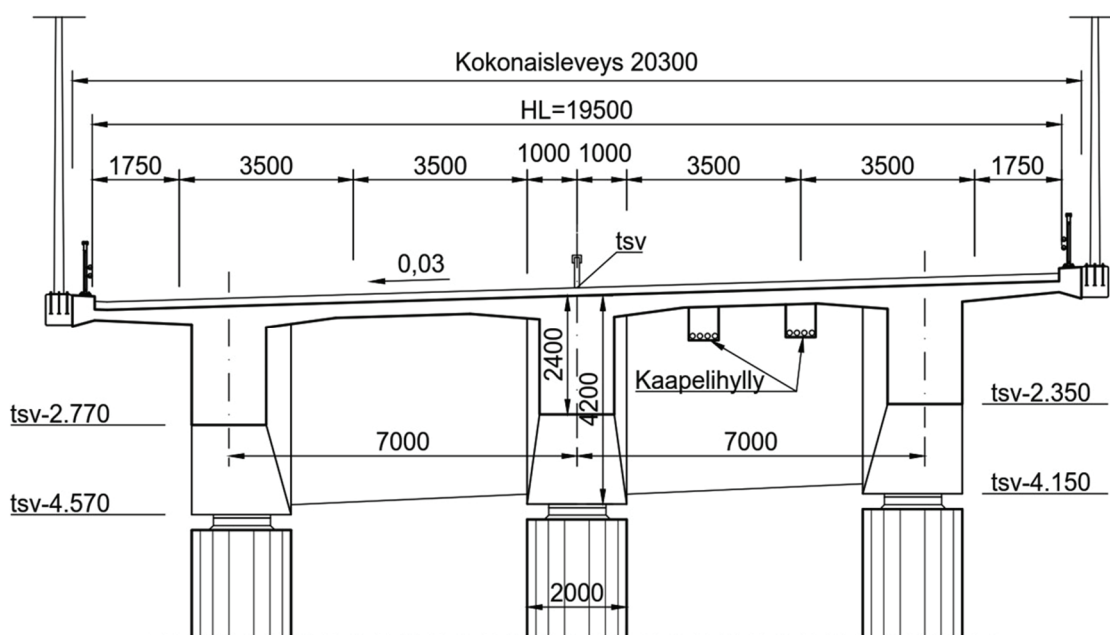




**Kuva 35.** Tärntämäen sillan sivu- ja tasokuva [3].

Sillan vaakageometria on hieman kaareva. Sillan kaikilla tuilla on kolme kalottilaakeria. Tuen T2 laakerit ovat kiinteitä sillan pituussuunnassa. Kaikkien tukien keskilinjän laakerit ovat kiinteitä sillan poikkisuunnassa. Sillan päätytuet T1 ja T4 on perustettu maanvaraisesti. Välituet T2 ja T3 on perustettu kallioon tukeutuvilla paaluilla.

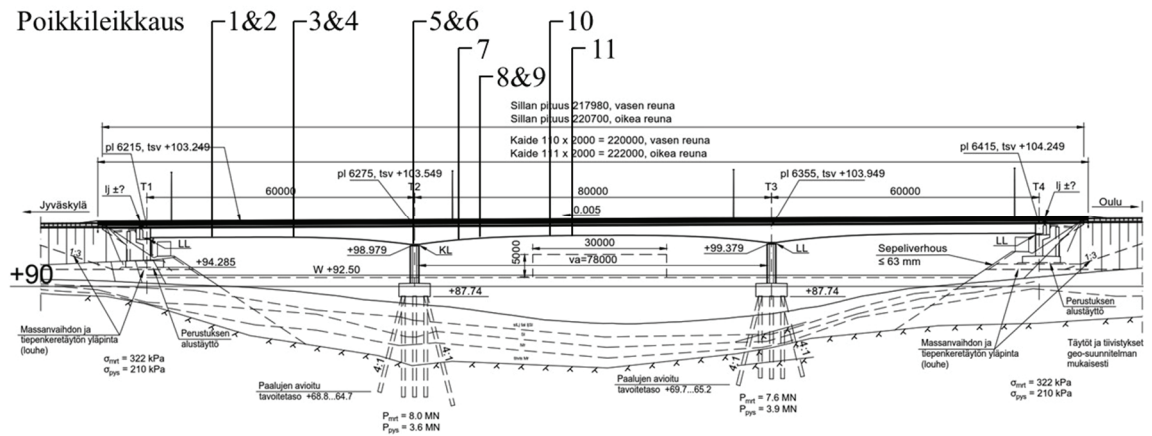
Sillan palkkien korkeus on välitukien kohdalla 4,2 m ja kentässä pienimmillään 2,4 m. Palkkien leveys on tukien kohdalla 2,0 m ja kentässä 1,5 m. Kansi on kallistettu 3 % sillan sivusuunnassa. Tämän työn laskelmissa, kuten alkuperäisissäkin laskelmissa, kansilaatta on otaksuttu vaakasuoraksi sillan sivusuunnassa. Alla olevassa kuvassa (Kuva 36) on esitetty sillan poikkileikkaus alustavasta yleispiirustuksesta.



**Kuva 36.** Tärntämäen sillan poikkileikkaus [3].

Sillan betonin lujuusluokka on C35/45-3. Päälysrakenteen nimellinen betonipeite on 45 mm. Jokaisessa palkissa olevien jänneiden lukumäärä vaihtelee palkkien pituussuunnassa välillä 12–16 kpl. Vastaavasti jokaisen palkin jänneiden kokonaispinta-ala vaihtelee välillä 34200–45600 mm<sup>2</sup>. Punostyyppi on Y1860S7.

Sillasta valittiin 11 palkin poikkileikkausta tarkastelua varten. Valitut poikkileikkaukset ovat joko reuna- tai keskipalkista. Poikkileikkausten valinnan perusteena oli NCCI 2:n mukaisen puristus- tai sivupinnan puristumurron yhteisvaikutuksen suuri käyttöaste sekä valittuihin poikkileikkauksiin nähden erilaiset rasitustilat. Lisäksi poikkileikkausten valinta tehtiin sillä perusteella, että tarkasteluun saataisiin poikkileikkauksia tuki- ja kenttäalueelta sekä niiden väliseltä alueelta. Alla olevassa kuvassa (Kuva 37) on esitetty tarkasteltavien poikkileikkausten sijainti ja poikkileikkauksista käytettävät numerot sillan sivukuvassa. Tarkasteltavien poikkileikkausten dimensioid, rasitukset ja lasketut kapasiteetit on esitetty liitteessä B.



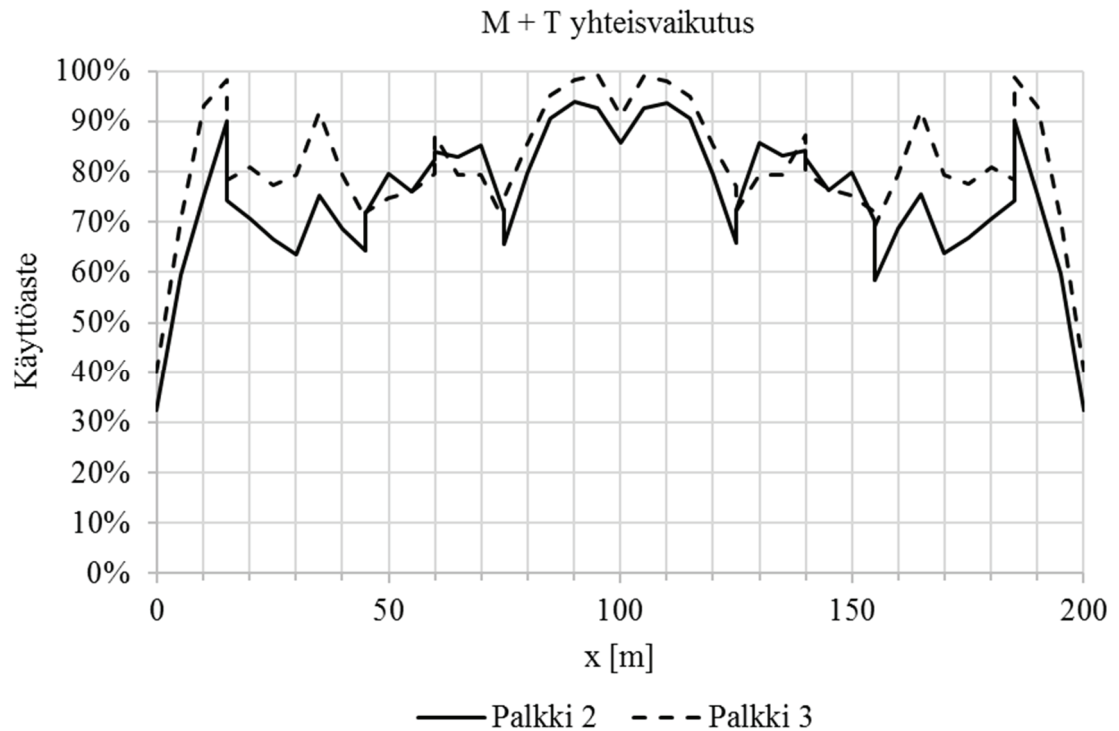
**Kuva 37.** Tärttämäen sillan tarkasteltavat poikkileikkaukset. Perustuu lähteeseen [3].

Sillan pituussuunnassa samoissa kohdissa olevat poikkileikkaukset on otettu eri palkeista. Tällöin tarkasteluun on saatu poikkileikkauksia, joilla on samat dimensiot, mutta erilainen rasiuksen suhde. Suurin osa poikkileikkauksista valittiin tarkasteluun korkean puristuspinnan puristumurren käyttöasteen perusteella. Poikkileikkaukset 8 ja 9 on valittu tarkasteluun korkean sivupinnan puristumurren käyttöasteen perusteella. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 4) on esitetty poikkileikkausten x-koordinaatit sillan pituussuunnassa sekä palkin numero, josta poikkileikkaus on valittu. Palkki numero 2 on sillan keskimäinen palkki ja 3 on oikeanpuoleinen palkki (Kuva 36).

**Taulukko 4.** Tarkasteltavien poikkileikkausten x-koordinaatit ja palkit.

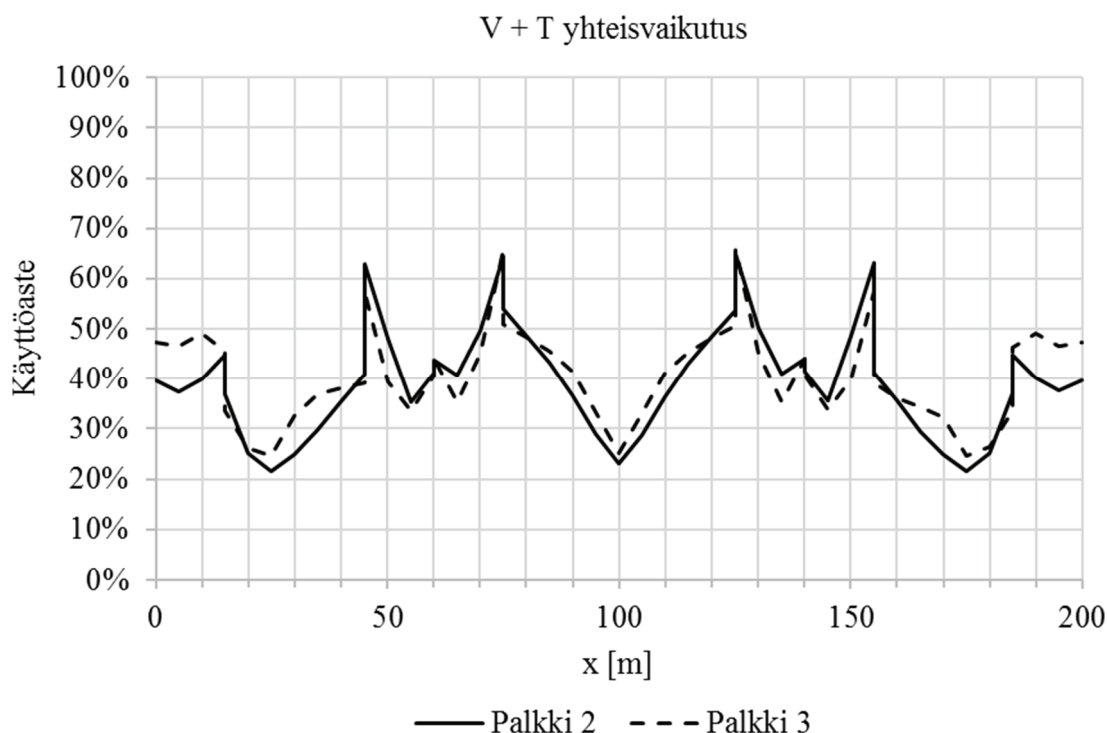
Poikkileikkaus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
x [m]	15	15	35	35	60	60	70	75	75	90	95
Palkki	2	3	2	3	2	3	2	2	3	2	3

Alla olevassa kuvassa (Kuva 38) on esitetty palkkien 2 ja 3 puristuspinnan puristumurren käyttöasteen käyttöasteet sillan pituussuuntaisen akselin (x) funktiona sillan rakennelaskelmien mukaisesti.



**Kuva 38.** Puristuspinnan puristumurron yhteisvaikutuskestävyyden käyttöasteet rakennelaskelmien mukaisesti. Perustuu lähteeseen [3].

Puristuspinnan puristumurtokestävyyden käyttöaste on suurimmillaan molemmissa palkkeissa keskikentässä ( $x = 95 \text{ m}$ ), jossa käyttöasteen arvo palkissa 3 on 99 %. Käyttöasteet ovat lähes kaikkialla suuremmat reunapalkissa (palkki 3) kuin keskipalkissa (palkki 2). Alla olevassa kuvassa (Kuva 39) on esitetty palkkien 2 ja 3 sivupinnan puristumurtokestävyyden käyttöasteet sillan pituussuuntaisen akselin ( $x$ ) funktiona sillan rakennelaskelmien mukaisesti.



**Kuva 39.** Sivupinnan puristusmurron yhteisvaikutuskestävyyden käyttöasteet rakennelaskelmien mukaisesti. Perustuu lähteeseen [3].

Sivupinnan puristusmurron käyttöaste on suurimmillaan keskikentän puoleisella tuen ja kentän välisellä alueella, jossa käyttöasteen arvo on 65 %. Sivupinnan puristusmurto ei siis ole alkuperäisten laskelmien perusteella mitoittava tekijä tässä sillassa. Reuna- ja keskipalkin käyttöasteet ovat koko sillan pituudella samaa suuruusluokkaa.

### 4.2.3 Poikkileikkausten raudoitus

Molempien siltojen raudoitus on mitoitettu NCCI 2:n mukaisesti. NCCI 2:n mukaisessa leikkausvoiman mitoituksessa betonin leikkauskapasiteetti huomioidaan raudoituksen leikkauskapasiteetin lisäksi. Eurokoodi ei mahdollista betonin leikkauskapasiteetin hyödyntämistä.

Tämän työn tasojännitystilojen mukaisessa mitoituksessa betonin leikkauskapasiteetti on nolla. Poikkileikkausten alkuperäisessä raudoituksessa on kuitenkin huomioitu betonin leikkauskestävyys, joka johtaa siihen, että pelkkä raudoituksen leikkauskapasiteetti on todennäköisesti liian pieni verrattuna leikkausvoimaan. Jotta puristusmurron tapausta voitaisiin tarkastella siten, että tasojännitystilan mukaisen tarkastelun tulokset säilyvät vertailukelpoisina NCCI 2:n mukaisiin tuloksiin, leikkausraudoitussuhdetta on korjattu leikkausvoiman aiheuttamille vaikutuksille. Leikkausraudoitussuhteen korjauskertoimenä on käytetty arvoa  $1/(1 - k_{V,c})$ , jossa  $k_{V,c}$  on betonin leikkauskapasiteetin suhteellinen osuus kokonaisleikkauskapasiteetista. Jokaiselle poikkileikkaukselle on ilmoitettu

muuttujan  $k_{v,c}$  arvot liitteissä A ja B. Liitteissä A ja B esitetyissä poikkileikkausten raudoitusmäärissä ei ole korjauskerrointa mukana.

Leikkausraudoituksen määrän muuttaminen ei vaikuta NCCI 2:n mukaisiin puristusmurtokestävyyksiin. Jos poikkileikkauksien todellinen raudoituksen ja puristusmurron mitoitustehäisiin tasojännitystilojen mukaisesti, raudoitusta ei voisi korottaa tällaisella kertoimella, sillä se vaikuttaa raudoituksen kestävyys ohella myös puristusmurtokestävyyteen.

## 5. TARKASTELUN TULOKSET

Tasojännitystilojen mukaisen puristusmurtokestävyyden analysoimiseksi tuloksia verrattiin puristuspinnassa NCCI 2:n mukaisiin tuloksiin sekä sivupinnassa NCCI 2:n ja EN 1992-2:n mukaisiin tuloksiin. Vertailu tehtiin puristusmurtokestävyyden käyttöasteen kautta.

Tasojännitystilojen mukaisessa laskennassa käyttöaste lasketaan puristusjännitysten avulla, kun taas NCCI 2:n ja EN 1992-2:n mukaisessa laskennassa se lasketaan rasiusten avulla. Tämä aiheuttaa ongelmia tulosten vertailussa, sillä jännitysten kautta laskettaessa käyttöaste ei kasva lineaarisesti rasiusten kasvaessa. Tällöin jännitysten käyttöasteen perusteella puristumurron mukaisia rasituksia ei voida ennustaa tarkasti. Kuitenkin käyttöasteiden vertailusta voidaan yleensä päätellä, että johtaako tasojännitystilojen mukainen laskenta suurempaan vai pienempään kapasiteettiin kuin NCCI 2:n ja EN 1992-2:n mukainen laskenta, kunhan NCCI 2:n ja EN 1992-2:n mukainen käyttöaste on korkea.

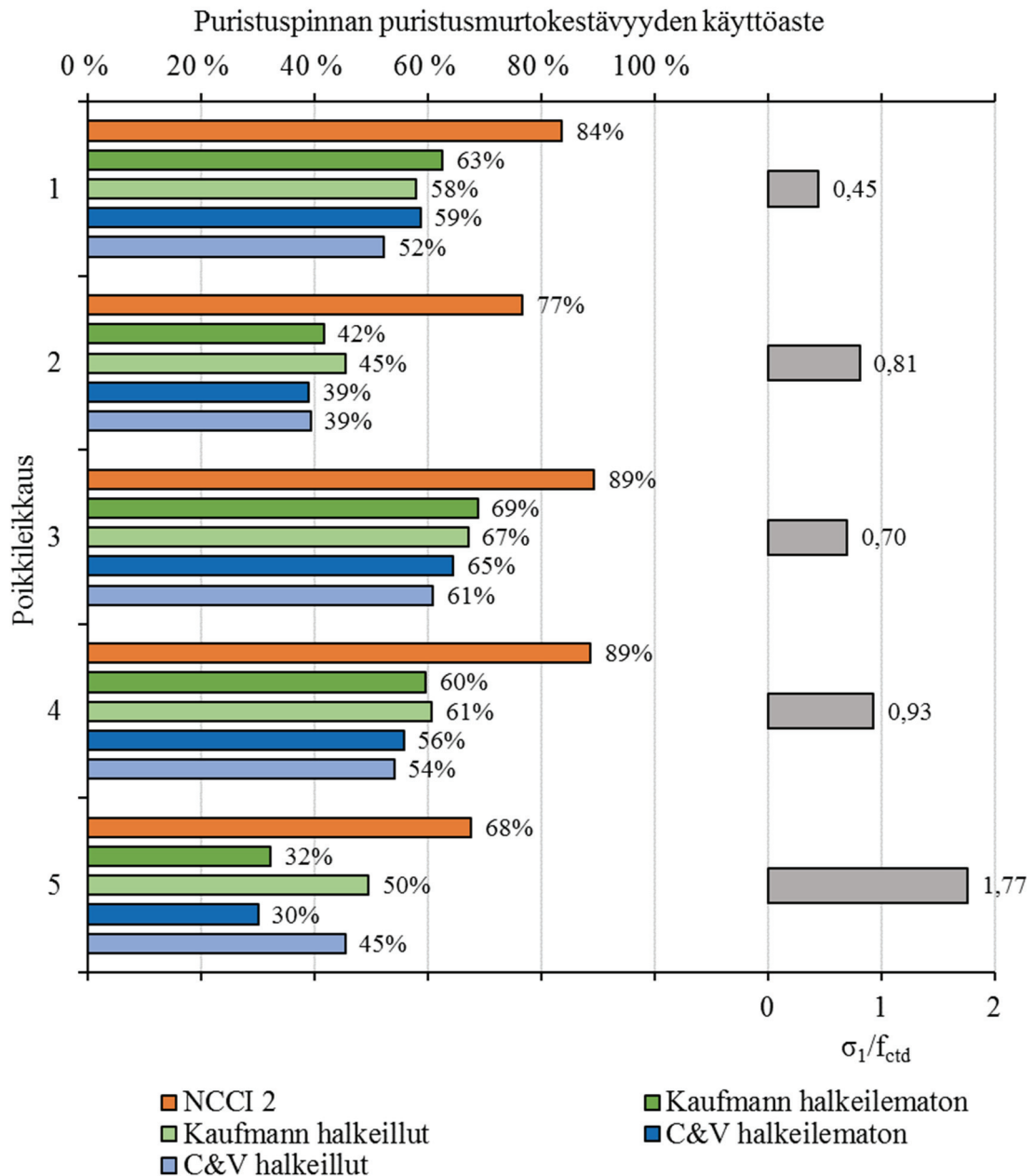
Puristus- ja sivupinnassa tasojännitystilojen mukaiset käyttöasteet on esitetty Collinsin ja Vecchion sekä Kaufmannin mukaisilla puristuskestävyyksillä laskettuna. Lisäksi puristuspinnalle on ilmoitettu sekä halkeilemattoman että halkeilleen tilan mukaiset käyttöasteet. Sivupinta otaksutaan aina halkeilleeksi. Liitteessä C on esitetty esimerkin avulla tässä työssä käytetyn tasojännitystiloihin perustuvan mitoituksen kulkua.

### 5.1 Västersundomin risteyssilta C

Västersundomin sillassa tarkasteltavia poikkileikkauksia oli 5 kappaletta. Poikkileikkauksiin kohdistuvat rasitukset valittiin vastaaviksi kuin alkuperäisten laskelmien mukaiset määräävimmat rasitukset. Poikkileikkausten dimensiot, rasitukset ja lasketut NCCI 2:n ja EN 1992-2:n mukaiset kapasiteetit on esitetty liitteessä A.

#### 5.1.1 Puristuspinta

Alla olevassa kuvassa (*Kuva 40*) on esitetty puristuspinnan puristusmurtokestävyyden käyttöaste sekä halkeilemattoman tilan päävetojännityksen suhde betonin vetolujuuden mitoitusarvoon. Betonin vetolujuuden mitoitusarvo ei välttämättä ole oikea suure kuvaamaan betonin halkeilukestävyyttä, mutta sen avulla voidaan vertailla päävetojännityksien suuruuksia ja sitä, että onko halkeilemattoman vai halkeilleen tilan mukainen puristusmurtokestävyyden käyttöaste mahdollisesti oikea.

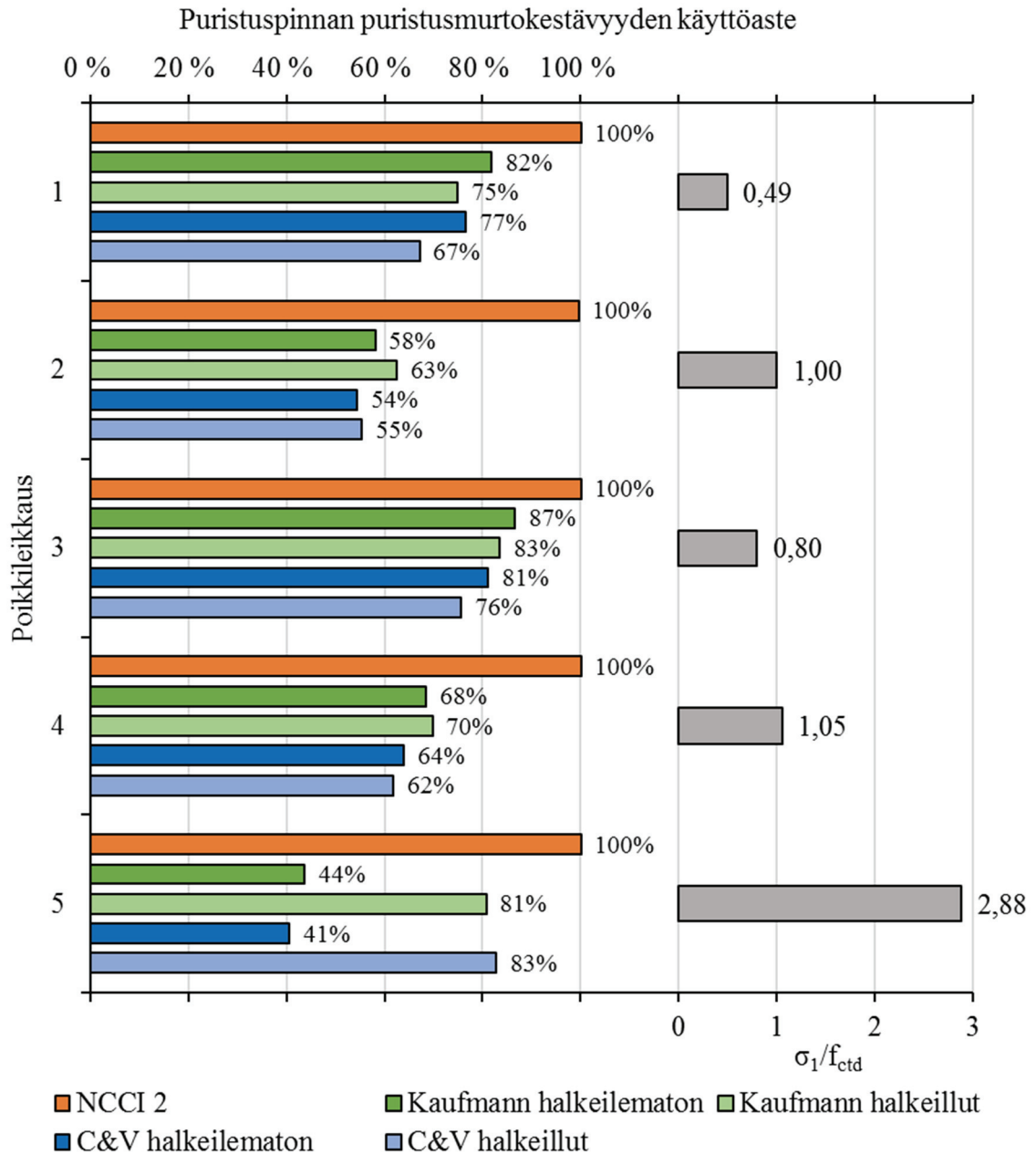


**Kuva 40.** Puristuspinnan puristumurtokestävyyden käyttöaste ja halkeilemattoman tilan päävetojännityksen suhde betonin vetolujuuden mitoitusarvoon.

Yllä olevan kuvan (Kuva 40) perusteella tasojännitystilän mukainen laskenta johtaa puristuspinnassa suurempiin kapasiteetteihin verrattuna NCCI 2:n mukaiseen laskentaan. Poikkileikkauksissa, jotka ei todennäköisesti halkeile eli päävetojännityksen suhde betonin vetokestävyyden mitoitusarvoon on suhteellisen pieni, halkeilemattoman tilan mukainen laskenta johtaa suurempiin käyttöasteisiin kuin halkeilleen tilan mukainen analyysi. Poikkileikkauksessa 5, jossa päävetojännitys on suhteellisen suuri, halkeilleen tilan mukainen käyttöaste on huomattavasti suurempi kuin halkeilemattoman. Collinsin ja Vecchion mukainen käyttöaste on kaikissa poikkileikkauksissa pienempi kuin Kaufmannin mukainen vastaavan tilan käyttöaste, mikä johtuu siitä, että tarkasteltavissa poikkileikkauksissa puristuspinnan päävenymät ovat pienempiä kuin 4,5 ‰ (ks. Kuva 26).



Alla olevassa kuvassa (Kuva 41) on esitetty puristusmurtokestävyyden käyttöasteet, kun taivutus- ja vääntömomenttia on skaalattu samassa suhteessa siten, että NCCI 2:n mukainen käyttöaste on 100 %. Kuvassa on myös esitetty halkeilemattoman tilan päävetojännityksen suhde betonin vetokestävyyden mitoitusarvoon.

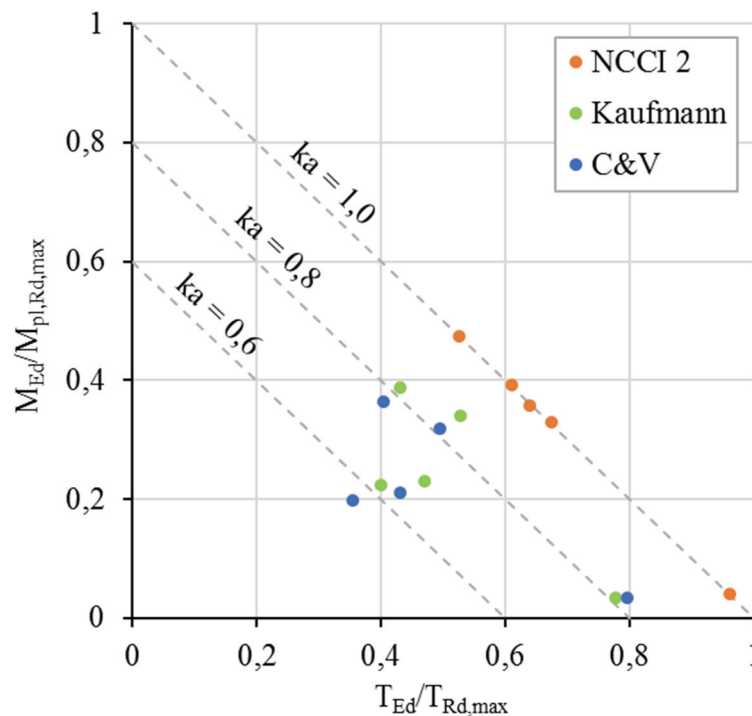


**Kuva 41.** Puristuspinnan puristusmurtokestävyyden käyttöaste ja halkeilemattoman tilan päävetojännityksen suhde betonin vetolujuuden mitoitusarvoon, kun taivutus- ja vääntömomenttia on skaalattu samassa suhteessa siten, että NCCI 2:n mukainen käyttöaste on 100 %.

Yllä olevan kuvan (Kuva 41) perusteella tasojännitystilän mukaisen laskennan käyttöasteet jäävät kaikissa poikkileikkauksissa pienemmäksi kuin NCCI 2:n mukaisen laskennan

käyttöasteet. Poikkileikkauksessa 5, jossa halkeilemattoman tilan päävetojännitys on suhteellisen suuri ( $2,88f_{ctd}$ ), halkeilleen tilan mukaiset käyttöasteet ovat noin kaksinkertaisia verrattuna halkeilemattoman tilan käyttöasteisiin.

Alla olevassa kuvassa (Kuva 42) puristuspinnan käyttöasteet on esitetty NCCI 2:n mukaisesti taivutus- ja vääntökestävyyden käyttöasteiden avulla. Tasojännitystilän mukaisista halkeilleen ja halkeilemattoman tilan käyttöasteista on valittu jokaisesta poikkileikkauksesta suurempi arvo. Lisäksi tasojännitystilän mukaiset käyttöasteet on kerrottu NCCI 2:n mukaisella taivutus- ja vääntökestävyyden käyttöasteella, jolloin jokaisen poikkileikkauksen tasojännitystilän mukaiset pisteet sijaitsevat vastaavan NCCI 2:n pisteen ja origon välisellä suoralla. Käyttöasteet kasvavat lineaarisesti origosta poispäin.

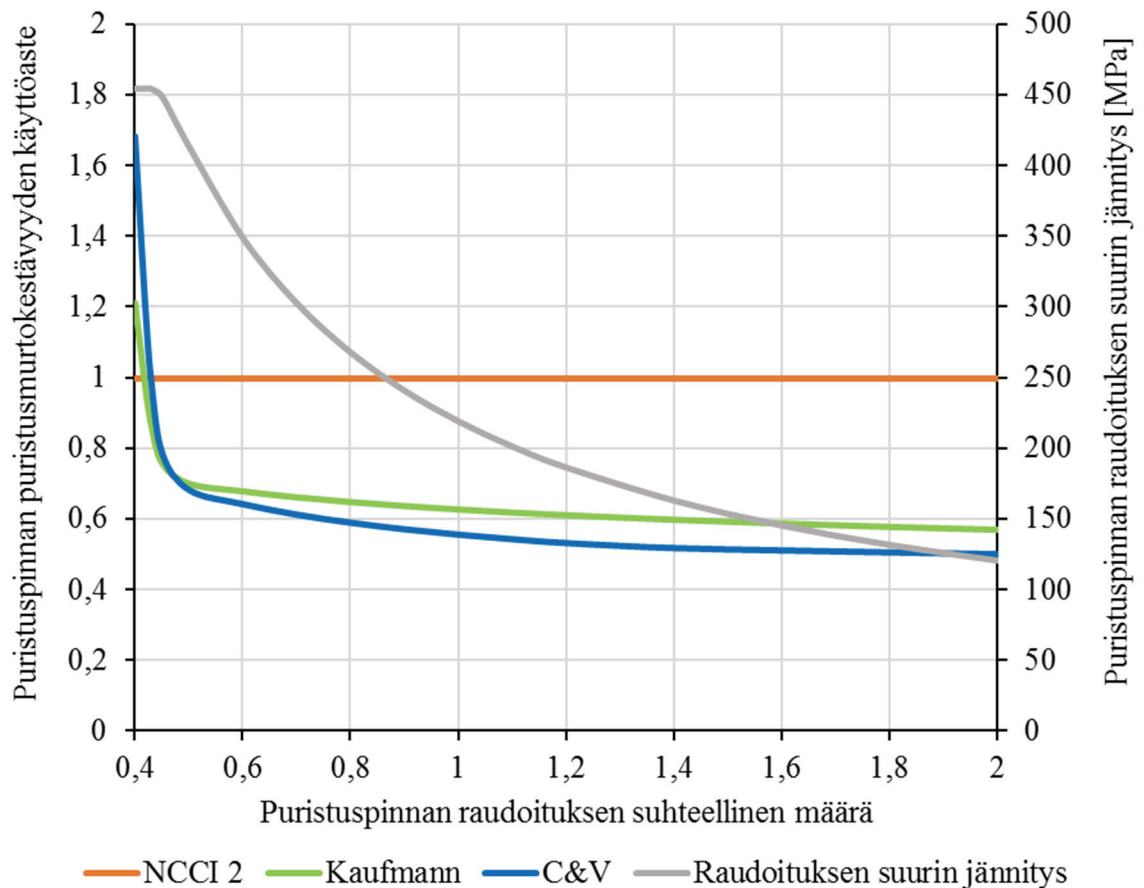


**Kuva 42.** Puristuspinnan puristumurtokestävyyden käyttöasteet (kuvassa merkitty ”ka”) suhteessa taivutus- ja vääntökestävyyteen, kun NCCI 2:n mukaiset käyttöasteet ovat 100 %.

Yllä olevasta kuvasta (Kuva 42) nähdään, että tarkasteltaviin poikkileikkauksiin kohdistuu suurempia vääntömomenteja kuin taivutusmomenteja suhteessa niiden vastaaviin puristumurtokestävyyksiin. Tasojännitystilän mukaisissa käyttöasteissa ei tässä koordinaatistossa havaita suurta korrelaatiota.

Poikkileikkauksella 2 tarkasteltiin myös puristuspinnan raudoituksen määrän vaikutusta halkeilleessa tilassa. Tarkastelu tehtiin rasituksilla, joilla NCCI 2:n mukainen puristuspinnan puristumurtokestävyyden käyttöaste on 100 %. Tällöin poikkileikkauksen 2 puristuspinnan halkeilemattoman tilan päävetojännitys on yhtä suuri kuin betonin vetokestävyyden mitoitusarvo (Kuva 41). Puristuspinnan raudoituksen määrää muutettiin paikallisesti x- ja y-suunnassa suunnassa samassa suhteessa. Raudoituskannan muuttaminen

tehtiin siten, että se ei vaikuttanut tasojännityskomponenttien suuruuteen. Puristuspinta oli tässä tapauksessa alapinnassa, jolloin muutettiin poikittaisen raudoituksen eli ulommaisten hakojen määrää sekä alapinnan pitkittäisen raudoituksen määrää. Alla olevassa kuvassa (Kuva 43) on esitetty NCCI 2:n ja halkeilleen tasojännitystilan mukaiset käyttöasteet raudoituksen suhteellisen määrän funktiona. Lisäksi kuvassa on esitetty puristuspinnan raudoituksen suurin jännitys raudoituksen suhteellisen määrän funktiona. Alkuperäisen raudoituksen suhteellinen määrä on 1.



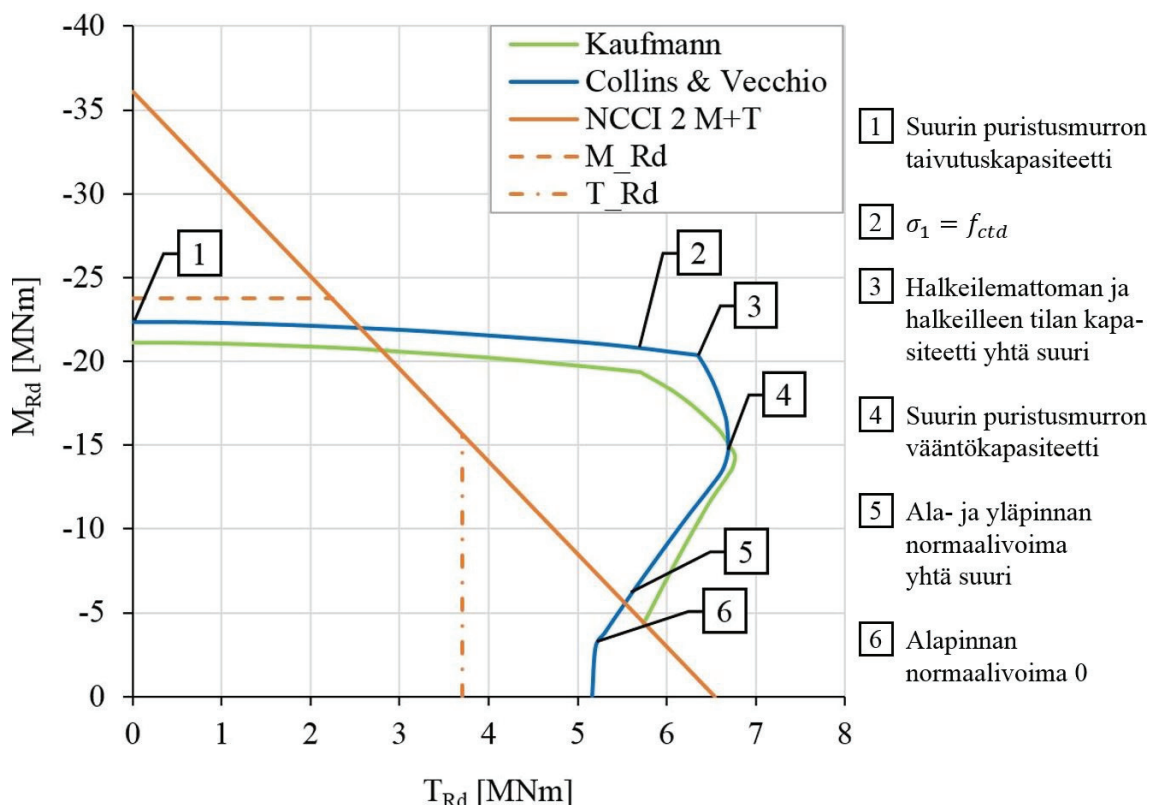
**Kuva 43.** Poikkileikkauksen 2 puristuspinnan puristumurtokestävyyden käyttöasteet puristuspinnan raudoituksen suhteellisen määrän funktiona, kun taivutus- ja vääntömomentti vastaavat NCCI 2:n käyttöastetta 1 (100 %).

Kun raudoituksen suhteellista määrää pienennetään arvoon 0,45, puristuspinnan poikittainen raudoitus alkaa myötää. Raudoituksen määrää edelleen pienennettäessä raudoituksen venymät ja päävenymä kasvavat voimakkaasti, joka nähdään yllä olevassa kuvassa (Kuva 43) tasojännitystilojen laskennan mukaisien käyttöasteiden voimakkaina nousuina. Kun raudoituksen suhteellinen määrä on 0,40, myös pituussuuntainen alapinnan raudoitus alkaa myötää, eikä tasojännityselementeille löydy enää tasapainoa. Toisin sanoen laskennan mukaan raudoitus ei tällöin enää kestä.

Kuitenkin puristusmurto on kuvan perusteella poikkileikkauksen 2 puristuspinnan ensisijainen murtotapa. Se tapahtuu, kun suhteellisen raudoituksen määrä on Kaufmannin mukaisessa laskennassa noin 0,42 ja Collinsin mukaisessa laskennassa noin 0,43. Vaikka raudoitusta olisi puristuspinnassa niin vähän, että raudoitus myötäisi ennen puristusmurtoa, puristuspinnan murtotapa ei olisi yllä olevan kuvan (Kuva 43) perusteella kovin sitkeä, sillä rasitusten kasvaessa muodonmuutokset lisääntyisivät hyvin nopeasti.

Kun raudoitus ei myödy, poikkileikkauksen 2 puristuspinnan tasojännitystilan mukaiset käyttöasteet ovat vähintään 30 % pienempiä kuin NCCI 2:n mukainen käyttöaste. Jos raudoituksen määrä kaksinkertaistetaan alkuperäisestä, Kaufmannin mukaisella laskennalla puristumurrion käyttöaste putoaa 63 prosentista 57 prosenttiin ja Collinsin ja Vecchion mukaisella laskennalla 55 prosentista 50 prosenttiin.

Alla olevassa kuvassa (Kuva 44) on esitetty poikkileikkauksien 1 ja 2 alapinnan puristusmurtokapasiteetin yhteisvaikutuskäyrät NCCI 2:n ja tasojännitystilan mukaisella laskennalla. Tasojännitystilan mukainen laskenta on esitetty sekä Kaufmannin että Collinsin ja Vecchion mukaisen betonin puristuskestävyyden mukaan. Kuvassa on myös esitetty NCCI 2:n mukainen taivutuskestävyys ( $M_{Rd}$ ) ja vääntöraudoituksen vääntökestävyys ( $T_{Rd}$ ). Poikkileikkaukset 1 ja 2 sijaitsevat välituen kohdalla (Kuva 32).



**Kuva 44.** Poikkileikkauksien 1 ja 2 alapinnan puristumurrion kapasiteettikäyrät taivutus- ja vääntömomentin yhteisvaikutukselle.

Yllä olevassa kuvassa (Kuva 44) tasojännitystilan mukaiset yhteisvaikutuksen kapasiteetit on ilmoitettu siten, että halkeilemattomasta ja halkeilleesta tilasta on valittu pienempi

kapasiteetti. Valitsemalla pienempi kapasiteetti laskenta on varmalla puolella. Lisäksi todellista halkeilukestävyyttä on vaikea ennustaa kuormitushistoriasta ja betonin epähomogeenisuudesta johtuen. Kaufmannin mukaisella betonin puristuskestävyydellä lasketta yhteisvaikutuksen puristumurtokapasiteettia ei ollut mahdollista laskea pienillä taivutusmomentin arvoilla ( $< 4,4 \text{ MNm}$ ), sillä raudoituksen murto oli ensisijainen murto-tapa. Kuvan numerointi on tehty selvyyden vuoksi vain Collinsin ja Vecchion mukaiseen kapasiteettikäyrään, mutta se pätee yhtä lailla myös Kaufmannin mukaiseen käyrään. Tasojännitystilän mukaisen kapasiteettikäyrän numeroitujen pisteiden merkitykset ja selitykset ovat seuraavat:

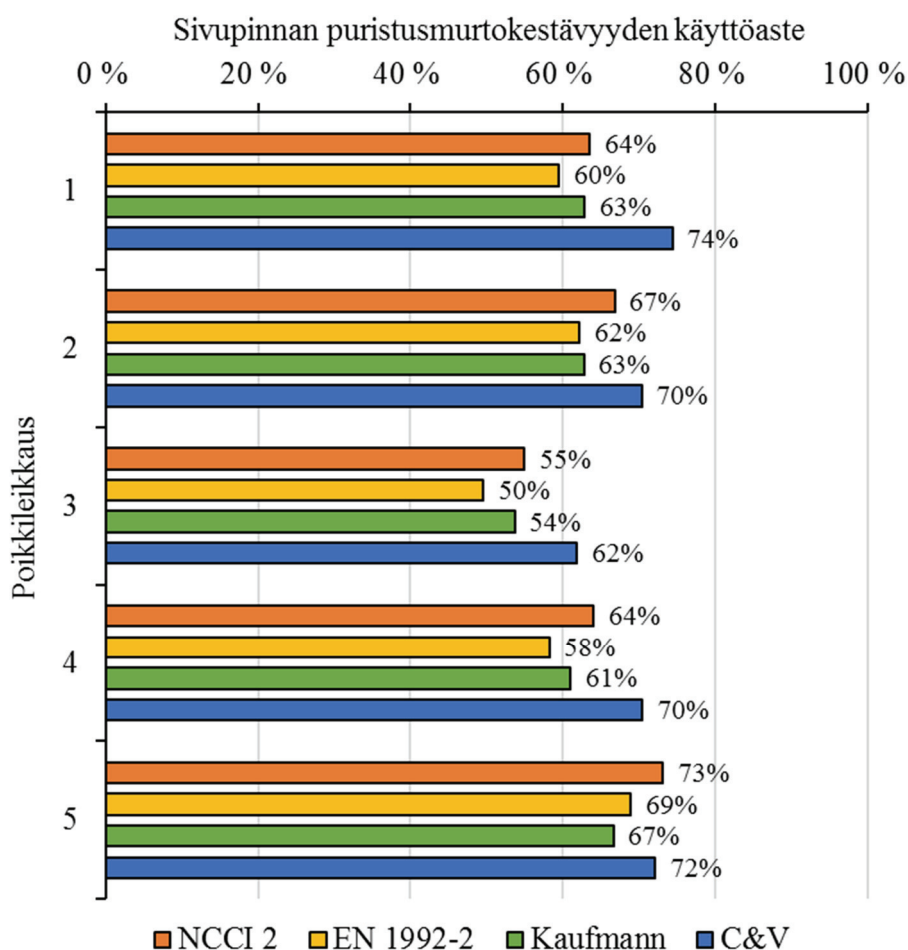
1. Suurin yhteisvaikutuksen taivutuskapasiteetti. Välillä 1-3 käytetään halkeilemattoman tilan kapasiteettia, sillä se on pienempi kuin halkeilleen tilan kapasiteetti. Yhteisvaikutuksen suurin taivutuskapasiteetti on pienempi kuin pelkästään taivutetun rakenteen taivutuskapasiteetti kahdesta syystä. Ensimmäiseksi betonin puristuskestävyys on nollan arvoisella poikittaisella venymällä sekä Kaufmannin että Collinsin ja Vecchion mukaisessa tarkastelussa pienempi kuin betonin puristuslujuus. Lisäksi taivutuksen ja väännön yhteisvaikutuksessa tämän työn mukaisella laskennalla ei päästä hyödyntämään betonin myötöpuristuman jälkeistä osuutta venymien  $\varepsilon_{c2}-\varepsilon_{cu2}$  välillä (Kuva 1) väännöstä johtuvien jännitysten takia, mistä johtuen yhteisvaikutuksen taivutuskapasiteetti jää pienemmäksi kuin pelkän taivutuksen taivutuskapasiteetti.
2. Halkeilemattoman tilan päävetojännitys ylittää betonin vetokestävyyden mitoitusarvon  $f_{ctd}$ .
3. Halkeilleen ja halkeilemattoman tilan kapasiteetit ovat yhtä suuret. Tästä eteenpäin käytetään halkeilleen tilan kapasiteettia, sillä se on pienempi.
4. Suurin yhteisvaikutuksen vääntökapasiteetti. Tästä eteenpäin poikittaissuuntainen alapinnan raudoitus alkaa myötäämään, mikä lisää huomattavasti päävenymää ja pienentää betonin puristuskestävyyttä.
5. Ala- ja yläpinnan pituussuuntainen puristusjännitys on yhtä suuri.
6. Alapinta on tästä pisteestä eteenpäin vedettynä taivutusmomentin ja jännevoiman yhteisvaikutuksesta.

Pisteen 3 ja sitä seuraavien pisteiden sijainti riippuu tarkasteltavassa poikkileikkauksessa paljon alapinnan raudoituksesta. Alapinnan raudoitusta lisäämällä nämä pisteet siirtyvät väännön suhteen eteenpäin eli kuvaa katsottaessa oikealle päin.

Kun taivutusmomentti on suhteellisen suuri verrattuna taivutuskestävyyteen ( $M_{Rd}$ ), tasojännitystilojen mukainen vääntökapasiteetti on huomattavasti suurempi verrattuna NCCI 2:n vastaavaan arvoon. Tämä ero korostuisi vielä enemmän, jos vääntöraudoitusta lisätäisiin, koska tällöin NCCI 2:n mukainen raudoituksen vääntökestävyys lisääntyisi ja NCCI 2:n mukainen yhteisvaikutuksen puristumurron kapasiteettikäyrä rajoittaisi taivutus- ja vääntökestävyyttä enemmän.

### 5.1.2 Sivupinta

Alla olevassa kuvassa (*Kuva 45*) on esitetty sivupinnan puristusmurtokestävyyden käyttöasteet tarkasteltaville poikkileikkauksille. Poikkileikkauksien 1–4 laskennassa sivupinnan raudoitus myöti molemmissa suunnissa, jolloin tasoelementille ei löydetty tasapainoa eikä käyttöastetta saatu ratkaistua. Käytännössä sivupinnan raudoitus ei kestänyt rasitusta. Tämän takia poikkileikkauksissa 1–4 sivupinnan raudoituksissa jouduttiin käyttämään raudoituksen lineaarista jännitys-muodonmuutos-kuviota, joka saattaa johtaa epävarmalla puolella oleviin tuloksiin, koska raudoitus ei tällöin myödy eikä sivupintaan synny suuria päävenymiä, jotka pienentäisivät paljon betonin puristuskestävyyttä.

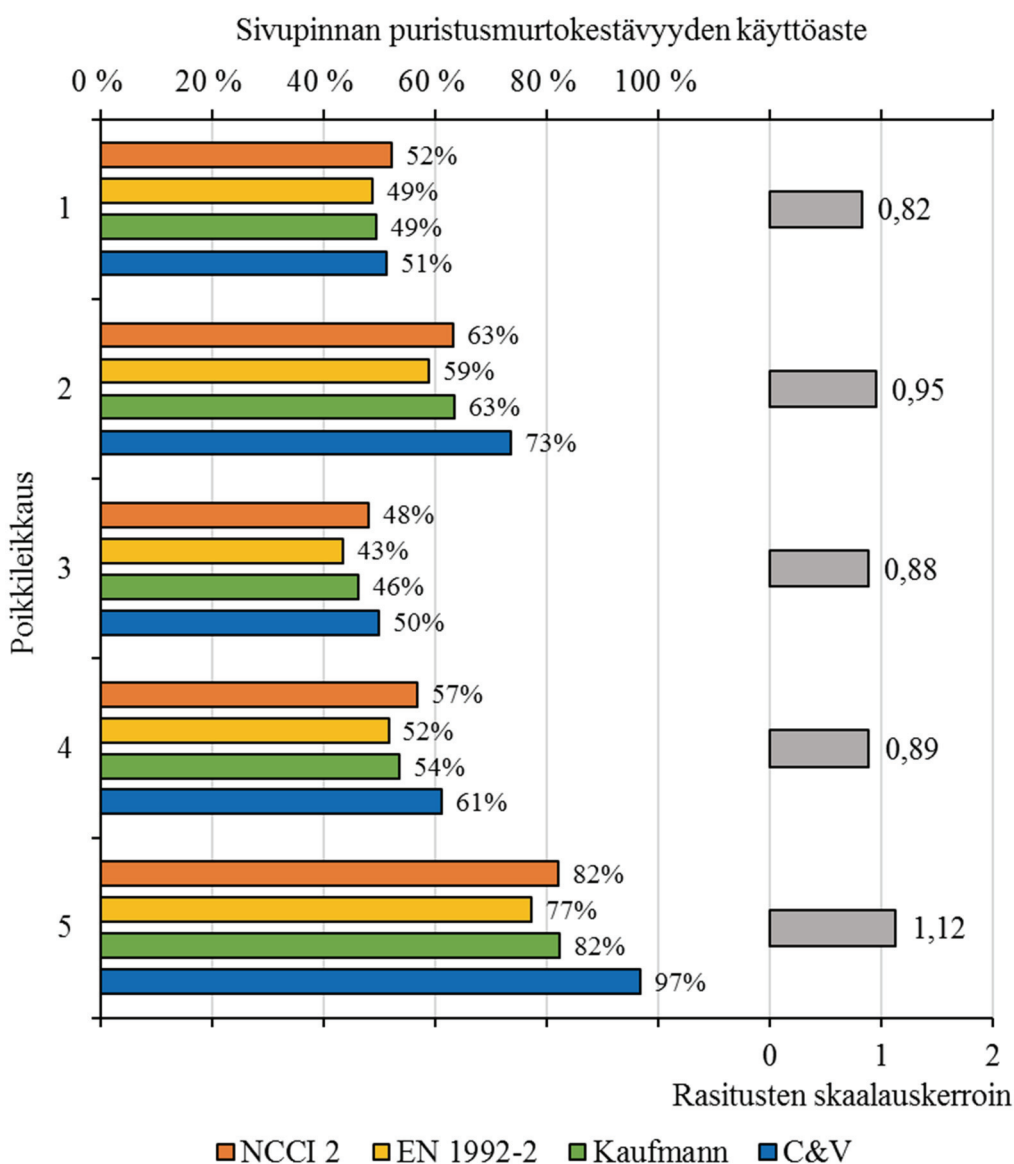


**Kuva 45.** Sivupinnan puristusmurtokestävyyden käyttöasteet.

Yllä olevan kuvan (*Kuva 45*) perusteella tasojännitystilän mukaisella laskennalla saatiin sivupinnassa saman suuruusluokan käyttöasteita kuin NCCI 2:n mukaisella laskennalla. Käyttöasteita verratessa kannattaa huomioida, että poikkileikkauksissa 1–4 sivupinnan raudoitus ei tasojännitystilän mukaisessa laskennassa kestänyt, jolloin betoni olisi raudoituksen suurien venymien takia lopulta puristusmurtunut, jos otaksutaan, että raudoitus voisi saavuttaa suuria venymiä katkeamatta. Collinsin ja Vecchion mukainen käyttö-

aste on puristuspinnasta poiketen kaikissa poikkileikkauksissa suurempi kuin Kaufmannin mukainen käyttöaste, mikä johtuu siitä, että tarkasteltavissa poikkileikkauksissa sivupinnan päävenymät ovat suurempia kuin 4,5 % (ks. Kuva 26).

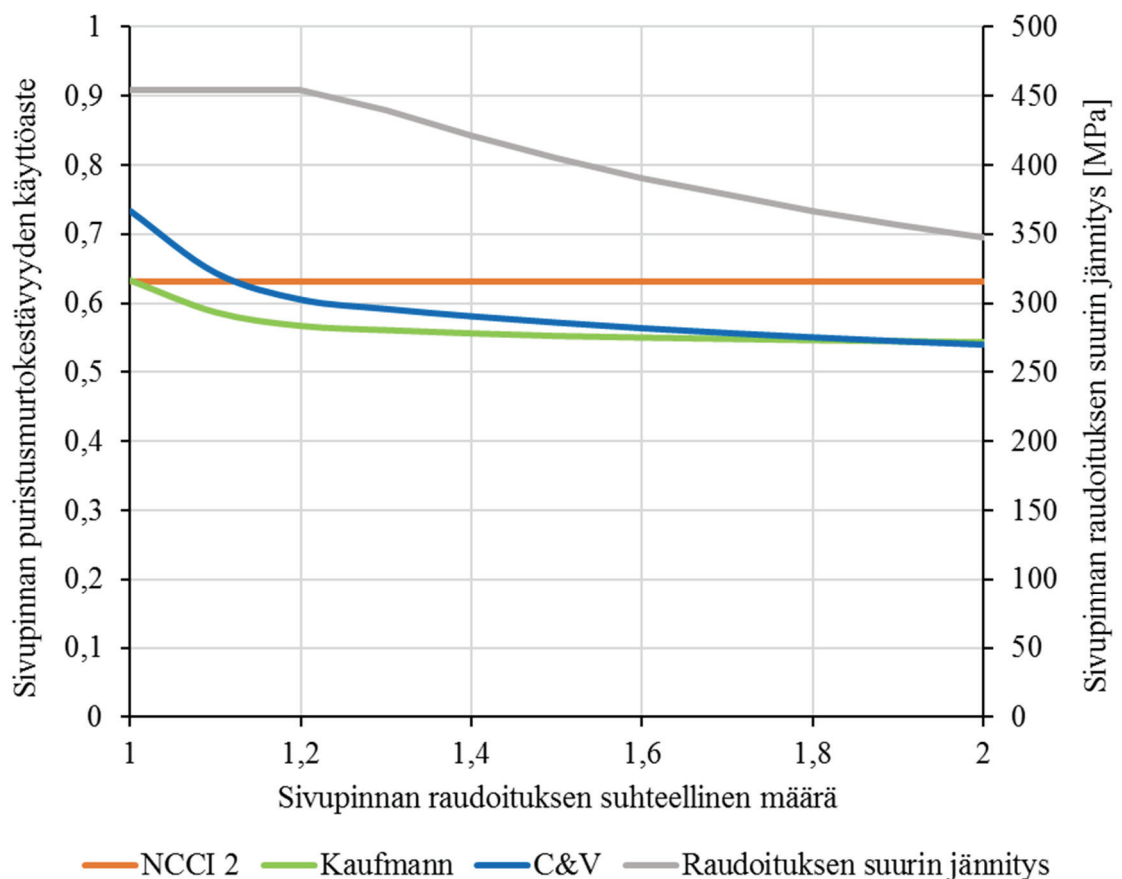
Jotta saataisiin murtotilanteesta mahdollisimman hyvä käsitys, poikkileikkausten rasituksia on skaalattu alla olevassa kuvassa (Kuva 46) sellaisiksi, että sivupinnan rauditus juuri kestää. Tällöin sivupinnan rauditukselle voidaan käyttää jokaisessa poikkileikkauksessa bilineaarista jännitys-muodonmuutos-kuviota (Kuva 3), joka on esitetty alaluvussa 2.1.2. Rasitusten skaalaus on tehty siten, että taivutusmomenttia, vääntömomenttia ja leikkausvoimaa on skaalattu samassa suhteessa.



**Kuva 46.** Sivupinnan puristusmurtokestävyyden käyttöasteet ja rasitusten skaaluskertoimet. Rasituksia on skaalattu samassa suhteessa siten, että sivupinnan rauditus juuri kestää.

Yllä olevan kuvan (*Kuva 46*) perusteella tasojännitystilojen avulla lasketuista käyttöasteista Kaufmannin mukaiset käyttöasteet ovat hyvin lähellä NCCI 2:n vastaavia käyttöasteita. Suurin ero näiden käyttöasteiden välillä on 3 %. Collinsin ja Vecchion mukaisesti lasketut käyttöasteet ovat kaikissa tarkasteltavissa poikkileikkauksissa suurempia kuin Kaufmannin mukaiset. Tämä johtuu siitä, että poikkileikkauksien päävenymät ovat suurempia kuin noin 4,5 %. EN 1992-2 mukaiset käyttöasteet ovat kaikissa poikkileikkauksissa pienimmät. Kaikissa tarkasteltavissa poikkileikkauksissa tasojännitystilan mukaisessa laskennassa raudoituksen murto on ensisijainen murtotapa.

Raudoitus kuitenkin kaikissa poikkileikkauksissa myötää johonkin suuntaan, joka johtaa suurempiin päävenymiin ja sitä kautta suurempiin tasojännitystilan mukaisen laskennan käyttöasteisiin. Alla olevassa kuvassa (*Kuva 47*) on tarkasteltu poikkileikkauksen 2 sivupinnan käyttöasteita, kun sivupinnan raudoituksen suhteellista määrää lisätään molemmissa suunnissa paikallisesti. Raudoitusmäärän lisääminen tehtiin siten, että se ei vaikuttanut tasojännityskomponenttien suuruuteen. Rasitukset ovat vastaavat kuin yllä esitetyssä kuvassa (*Kuva 46*).



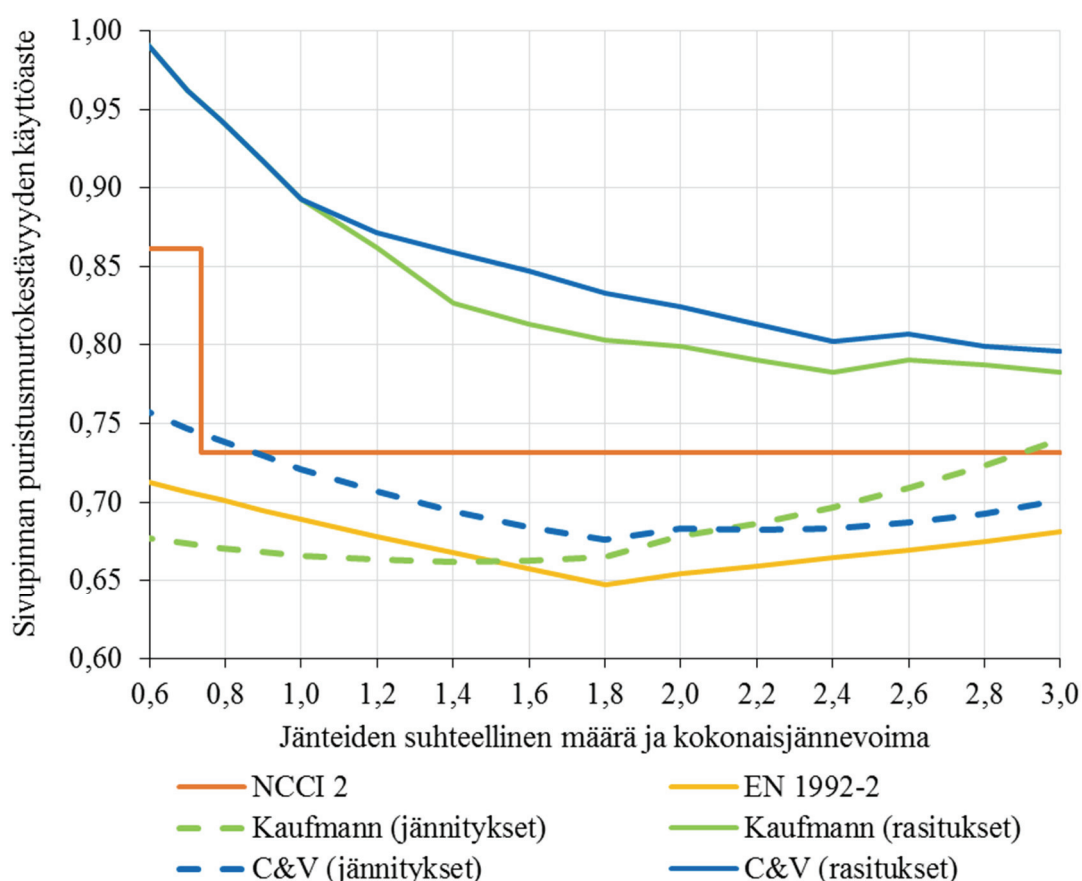
**Kuva 47.** Poikkileikkauksen 2 sivupinnan puristumurtokestävyys käyttöasteet sivupinnan raudoituksen suhteellisen määrän funktiona, kun taivutusmomentti, vääntömomentti ja leikkausvoima ovat sellaiset, että alkutilanteessa raudoitus juuri kestää.



Yllä olevassa kuvassa (*Kuva 47*) sivupinnan pystysuuntainen raudoitus eli haat myötäävät siihen asti, kun sivupinnan raudoituksen suhteellinen määrä on 1,2. Kuvasta myös nähdään, että raudoituksen myötäminen nostaa tasojännitystilan mukaisesti laskettuja käyttöasteita, mutta ei niin rajusti kuin puristuspinnassa (*Kuva 43*). Tästä voidaan päätellä, että rasiusten kasvaessa jännitykset voivat vielä jakaantua uudelleen, vaikka raudoitus myötäisikin, ja sivupinta toimii raudoituksen myötäessä sitkeämmin kuin puristuspinna.

Kun raudoitus ei myöda poikkileikkauksen 2 sivupinnassa, sekä Kaufmannin että Collin-sin ja Vecchion mukaiset käyttöasteet ovat pienemmät kuin NCCI 2:n mukainen käyttöaste. Käyttöasteet laskevat entisestään, kun raudoitusta edelleen lisätään.

Alla olevassa kuvassa (*Kuva 48*) on esitetty jännevoiman vaikutus poikkileikkauksen 5 sivupinnan puristumurtokestävyyteen. Tasojännitystilan mukaan lasketut tulokset on esitetty jännitysten käyttöasteen sekä rasiusten käyttöasteen mukaan laskettuna. Rasiusten käyttöaste on laskettu kapasiteetin osalta siten, että leikkausvoimaa ja vääntömomenttia on skaalattu samassa suhteessa, kunnes betonin pääpuristusjännitys on yhtä suuri puristuskestävyyden kanssa. Jännevoiman muuttumisen vaikutusta pakkovoimiin ja ohjausvoimiin ei ole huomioitu.



**Kuva 48.** Poikkileikkauksen 5 sivupinnan puristumurtokestävyyden käyttöaste suhteellisen kokonaisjännivoiman funktiona.

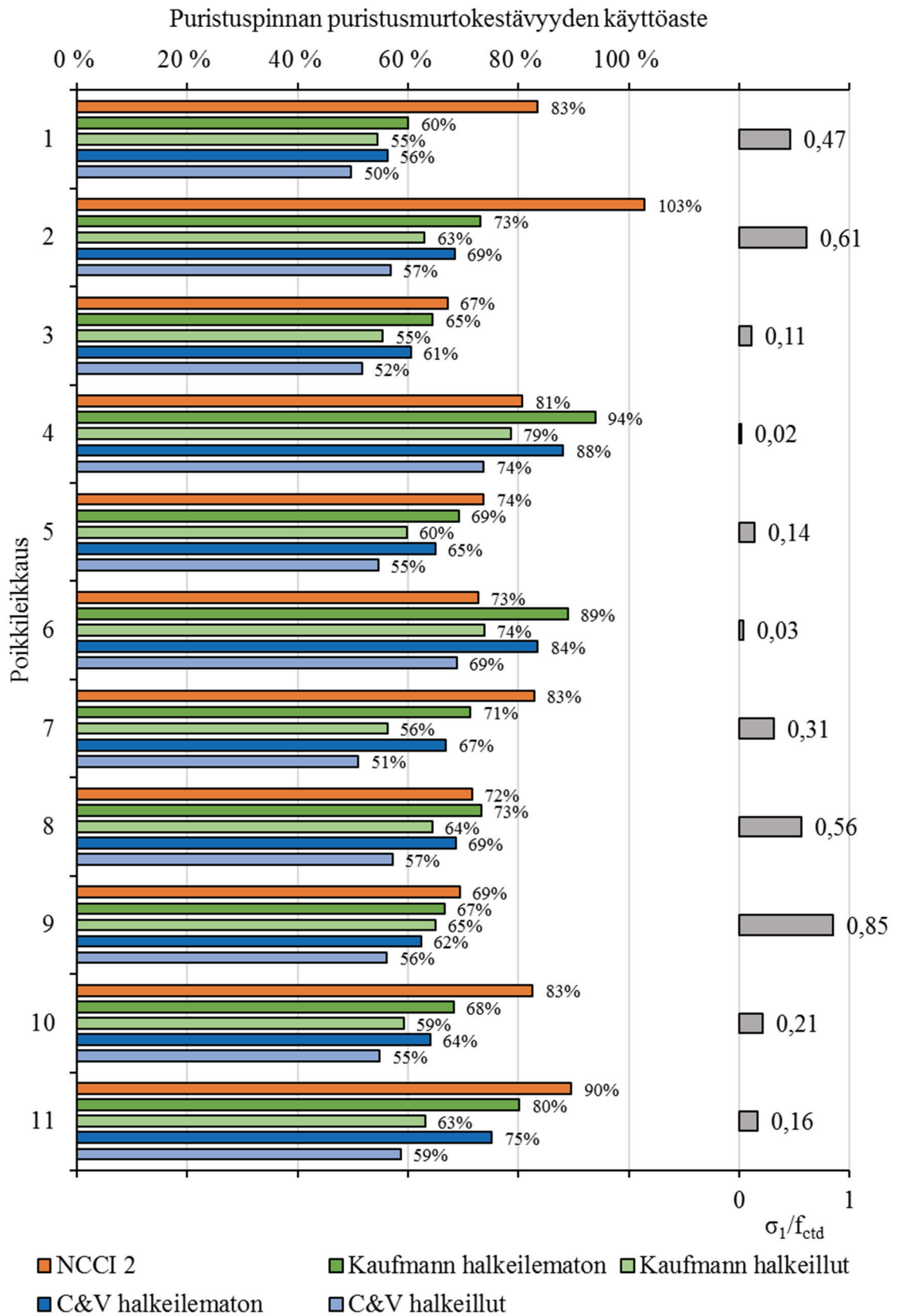
Yllä olevasta kuvasta (*Kuva 48*) huomataan, että vaikka jännitysten mukaan lasketut ta-sojännitystilan mukaiset puristusmurtokestävyyden käyttöasteet ovat samaa suuruusluok-kaa NCCI 2:n ja EN 1992-2:n mukaisten käyttöasteiden kanssa niin rasi-tusten mukaan lasketut eivät. Rasi-tusten mukaan lasketut käyttöasteet johtavat tutkitussa poikkileikkauk- sessa suurempiin käyttöasteisiin kuin NCCI 2:n ja EN 1992-2:n mukaan lasketut käyttö-asteet. Yhtenä syynä tähän on poikkileikkauksen sivupinnan vähäinen raudoitus, jonka murto on laskennan mukaan ensisijainen murtotapa Collinsin ja Vecchion mukaisessa laskennassa noin 1,1 kertaiseen jänteiden suhteelliseen määrään asti ja Kaufmannin mu- kaisessa laskennassa noin 1,4 kertaiseen jänteiden suhteelliseen määrään asti. Näistä ar-voista eteenpäin puristusmurto on ensisijainen, mutta raudoitus kuitenkin myötää ennen sen saavuttamista, mikä aiheuttaa puristusmurtokapasiteetin pienenemistä. Jänteiden ja jännevoiman suhteellisella määrällä 0,56 laskennan mukaan raudoitus murtuu. Rakenne on taivutusmurron kannalta sitkeä kaikilla tarkasteltavilla jänteiden määrällä. Taivutus- murto on luonteeltaan hauras, kun jänteiden suhteellinen määrä on noin 3,14 tai enem- män. Kuvasta huomataan, että jännitysten mukainen käyttöasteen laskenta ei sovellu kes- tävyyden arviointiin, ellei vertailtavan arvon käyttöaste ole 1 tai lähellä sitä.

## 5.2 Tärttämäen silta

Tärttämäen sillassa tarkasteltavia poikkileikkauksia oli 11 kappaletta. Poikkileikkauksiin kohdistuvat rasitukset valittiin vastaaviksi kuin alkuperäisten laskelmien mukaiset mää- räävimät rasitukset. Poikkileikkausten dimensiot, rasitukset ja lasketut NCCI 2:n ja EN 1992-2:n mukaiset kapasiteetit on esitetty liitteessä B.

### 5.2.1 Puristuspinta

Alla olevassa kuvassa (*Kuva 49*) on esitetty jokaiselle tarkasteltavalle poikkileikkaukselle puristuspinnan puristusmurtokestävyyden käyttöaste sekä halkeilemattoman tilan pääve- tojännityksen suhde betonin vetolujuuden mitoitusarvoon.

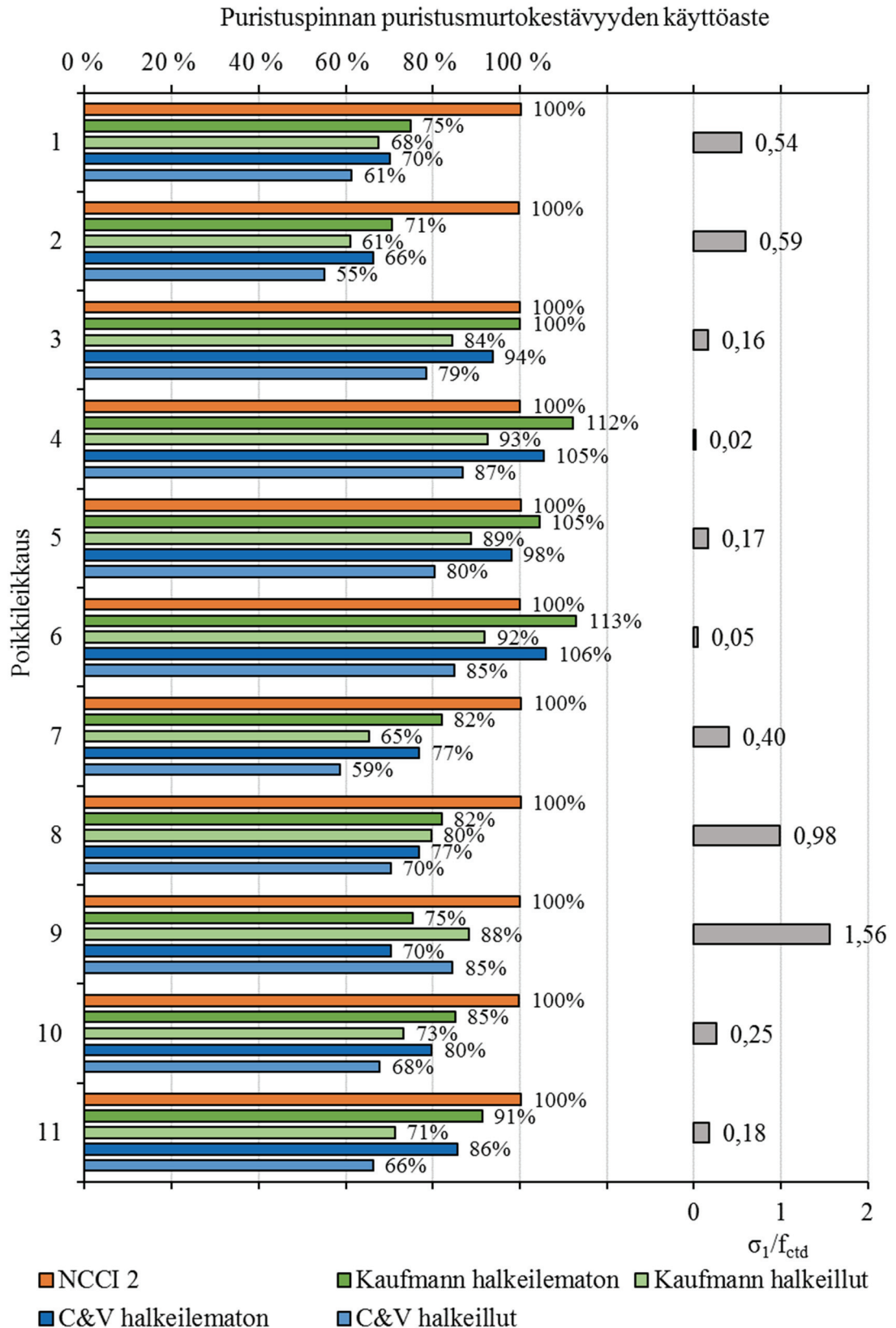


**Kuva 49.** Puristuspinnan puristumurtokestävyyden käyttöasteet ja halkeilemattoman tilan päävetojännityksen suhde betonin vetokestävyyden mitoitusarvoon.

Yllä esitetyn kuvan (*Kuva 49*) perusteella missään poikkileikkauksessa ei tapahdu puristusmurtoa tasojännitystilojen mukaisella laskennalla. NCCI 2:n mukaiset käyttöasteet ovat enimmäkseen suurempia kuin vastaavat tasojännitystilan mukaiset käyttöasteet, mutta poikkileikkauksissa 4, 6 ja 8 vähintään halkeilemattoman tasojännitystilan mukaan lasketut käyttöasteet ovat suurempia kuin NCCI 2:n vastaavat.

Kaikissa poikkileikkauksissa halkeilemattoman tilan päävetojännitys on pienempi kuin betonin vetokestävyyden mitoitusarvo. Tästä voidaan päätellä, että poikkileikkausten puristuspinnoissa ei mahdollisesti tapahdu halkeilua.

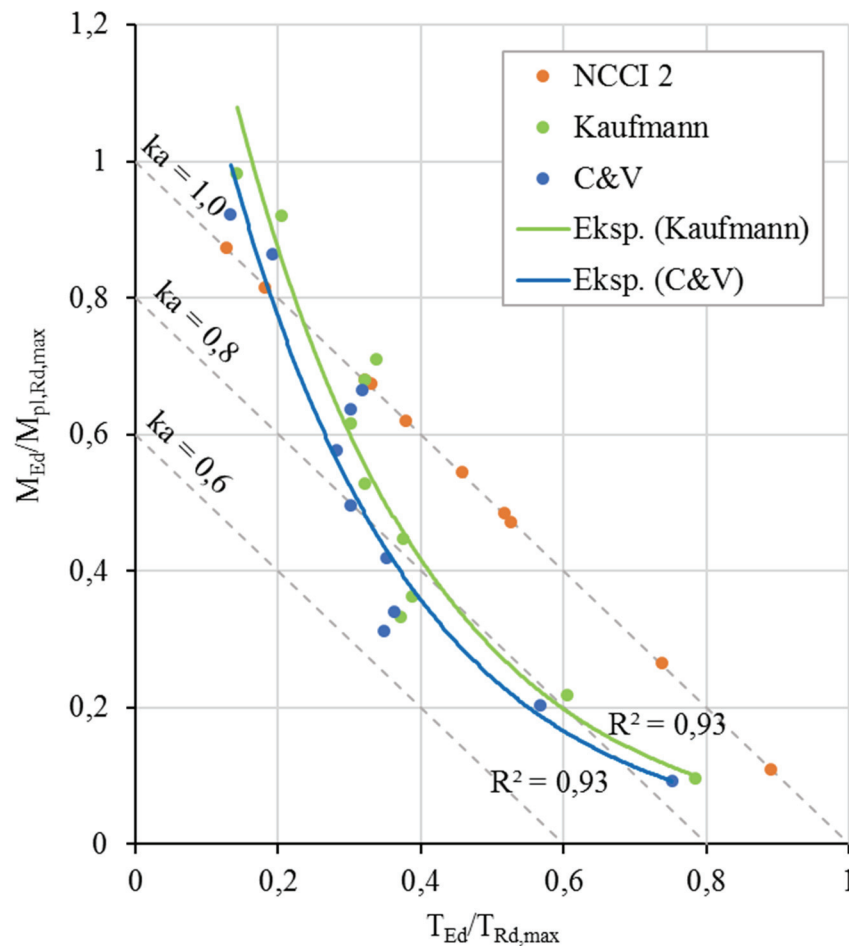
Alla olevassa kuvassa (*Kuva 50*) poikkileikkauksiin kohdistuvia taivutus- ja vääntömomentteja on skaalattu samassa suhteessa siten, että poikkileikkausten NCCI 2:n mukainen puristuspinnan puristumurtokestävyyden käyttöaste on 100 %. Tällöin NCCI 2:n mukaisessa puristumurtotilanteessa voidaan päätellä, kestäisikö poikkileikkaus tasojännitystilojen mukaan laskettuna vai ei.



**Kuva 50.** Puristuspinnan puristumurtokestävyyden käyttöasteet ja halkeilemattoman tilan päävetojännityksen suhde betonin vetokestävyyden mitoitusarvoon, kun NCCI 2:n mukainen käyttöaste on 100 %.

Poikkileikkauksissa 4, 5 ja 6 saavutetaan halkeilemattoman tasojännitystilän mukaan puristumurto. Näissä poikkileikkauksissa puristuspinnan halkeilemattoman tilan päävetojännitys on paljon pienempi kuin betonin vetokestävyyden mitoitusarvo ( $\sigma_1 \ll f_{ctd}$ ). Ainoastaan poikkileikkauksessa 9 päävetojännitys on suurempi kuin betonin vetokestävyyden mitoitusarvo ( $\sigma_1 > f_{ctd}$ ). Se on myös ainoa poikkileikkaus, jossa halkeilleen tilan mukainen käyttöaste on suurempi kuin halkeilemattoman.

Yllä olevan kuvan (Kuva 50) mukaiset käyttöasteet on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 51) NCCI 2:n mukaisesti taivutus- ja vääntökestävyyden käyttöasteiden avulla. Tasojännitystilän mukaisista halkeilleen ja halkeilemattoman tilan käyttöasteista on valittu jokaisesta poikkileikkauksesta suurempi arvo. Lisäksi tasojännitystilän mukaiset käyttöasteet on kerrottu NCCI 2:n mukaisella taivutus- ja vääntökestävyyden käyttöasteella, jolloin jokaisen poikkileikkauksen tasojännitystilän mukaiset pisteet sijaitsevat vastaavan NCCI 2:n pisteen ja origon kautta kulkevalla suoralla. Käyttöasteet kasvavat lineaarisesti origosta pois päin.

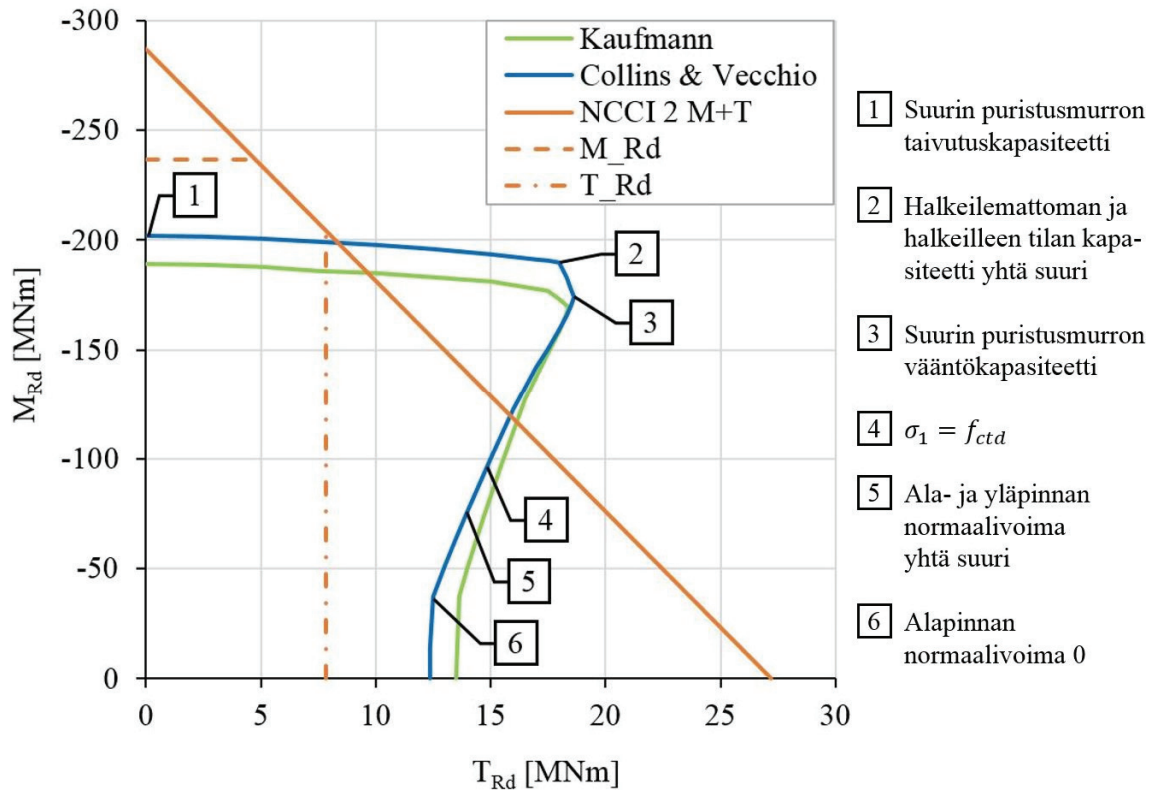


**Kuva 51.** Puristuspinnan puristumurtokestävyyden käyttöasteet (kuvassa merkitty ”ka”) suhteessa taivutus- ja vääntökestävyyteen, kun NCCI 2:n mukaiset käyttöasteet ovat 100 %.

Yllä olevan kuvan (*Kuva 51*) perusteella tarkasteltavien poikkileikkauksien taivutus- ja vääntömomenttien suhteet ovat hyvin erilaisia. Sekä Kaufmannin että Collinsin ja Vecchion mukaisen laskennan käyttöasteisiin on sovitettu eksponentiaaliset trendiviivat. Trendiviivojen korrelaatiokertoimien arvoiksi on saatu 0,93, jota voidaan pitää hyvänä arvona (arvolla 0 korrelaatiota ei ole ja arvolla 1 korrelaatio on täydellinen).

Kuvan perusteella voidaan siis tulkita, että tarkasteltavissa poikkileikkauksissa tasojännitystilan mukaan laskettuna puristuspinna mahdollisesti kestää suurempia taivutus- ja vääntömomentteja puristumurtumatta kuin NCCI 2:n mukaan laskettuna, kunhan NCCI 2:n mukainen taivutusmomentin suhde tasapainoraidoitettun poikkileikkauksen taivutuskestävyyteen on suuruusluokaltaan alle 0,7–0,8. Kun taivutusmomentin käyttöaste ylittää tämän rajan, kuvan perusteella NCCI 2:n mukainen laskenta on epävarmalla puolella tasojännitystilan mukaiseen laskentaan verrattuna. Tämä saattaa johtua siitä, että NCCI 2:n mukaisessa laskennassa käytetään tasapainoraidoitettua taivutuskestävyyttä ( $M_{pl,Rd,max}$ ) sekä tasojännitystilan mukaisessa mitoituksessa betonin puristuskestävyys ei saavuta betonin puristuslujuutta edes hyvin pienillä päävenymillä (*Kuva 26*).

Alla olevassa kuvassa (*Kuva 52*) on esitetty poikkileikkauksen 6 alapinnan puristumurtokapasiteetin yhteisvaikutuskäyrät NCCI 2:n ja tasojännitystilan mukaisella laskennalla. Tasojännitystilan mukainen laskenta on esitetty sekä Kaufmannin että Collinsin ja Vecchion mukaisen betonin puristuskestävyyden mukaan. Kuvassa on myös esitetty NCCI 2:n mukainen taivutuskestävyys ( $M_{Rd}$ ) ja vääntöraudoituksen vääntökestävyys ( $T_{Rd}$ ). Poikkileikkaus 6 sijaitsee välituen kohdalla (*Kuva 37*).



**Kuva 52.** Poikkileikkauksen 6 alapinnan puristusmurron kapasiteettikäyrät taivutus- ja vääntömomentin yhteisvaikutukselle.

Yllä olevassa kuvassa (Kuva 52) tasojännitystilän mukaiset yhteisvaikutuksen kapasiteetit on ilmoitettu siten, että halkeilemattomasta ja halkeilleesta tilasta on valittu pienempi kapasiteetti. Valitsemalla pienempi kapasiteetti laskenta on varmalla puolella. Lisäksi todellista halkeilukestävyyttä on vaikea ennustaa kuormitushistoriasta ja betonin epähomogeenisuudesta johtuen. Kuvan numerointi on tehty selvyyden vuoksi vain Collinsin ja Vecchion mukaiseen kapasiteettikäyrään, mutta se pätee yhtä lailla myös Kaufmannin mukaiseen käyrään. Tasojännitystilän mukaisen kapasiteettikäyrän numeroitujen pisteiden merkitykset ja selitykset ovat seuraavat:

1. Suurin yhteisvaikutuksen taivutuskapasiteetti. Välillä 1-2 käytetään halkeilemattoman tilan kapasiteettia, sillä se on pienempi kuin halkeilleen tilan kapasiteetti. Syyt, miksi yhteisvaikutuksen taivutuskapasiteetti jää pienemmäksi kuin pelkästään taivutetun rakenteen taivutuskapasiteetti, on esitetty alaluvussa 5.1.1 vastaavan kuvan (Kuva 44) alla kohdassa 1.
2. Halkeilleen ja halkeilemattoman tilan kapasiteetit ovat yhtä suuret. Tästä eteenpäin käytetään halkeilleen tilan kapasiteettia, sillä se on pienempi.
3. Suurin yhteisvaikutuksen vääntökapasiteetti. Tästä eteenpäin poikittaissuuntainen alapinnan rauditus alkaa myötäämään, mikä lisää huomattavasti päävenymää ja pienentää betonin puristuskestävyyttä.
4. Halkeilemattoman tilan päävetojännitys ylittää betonin vetokestävyyden mitoitusarvon  $f_{ctd}$ .



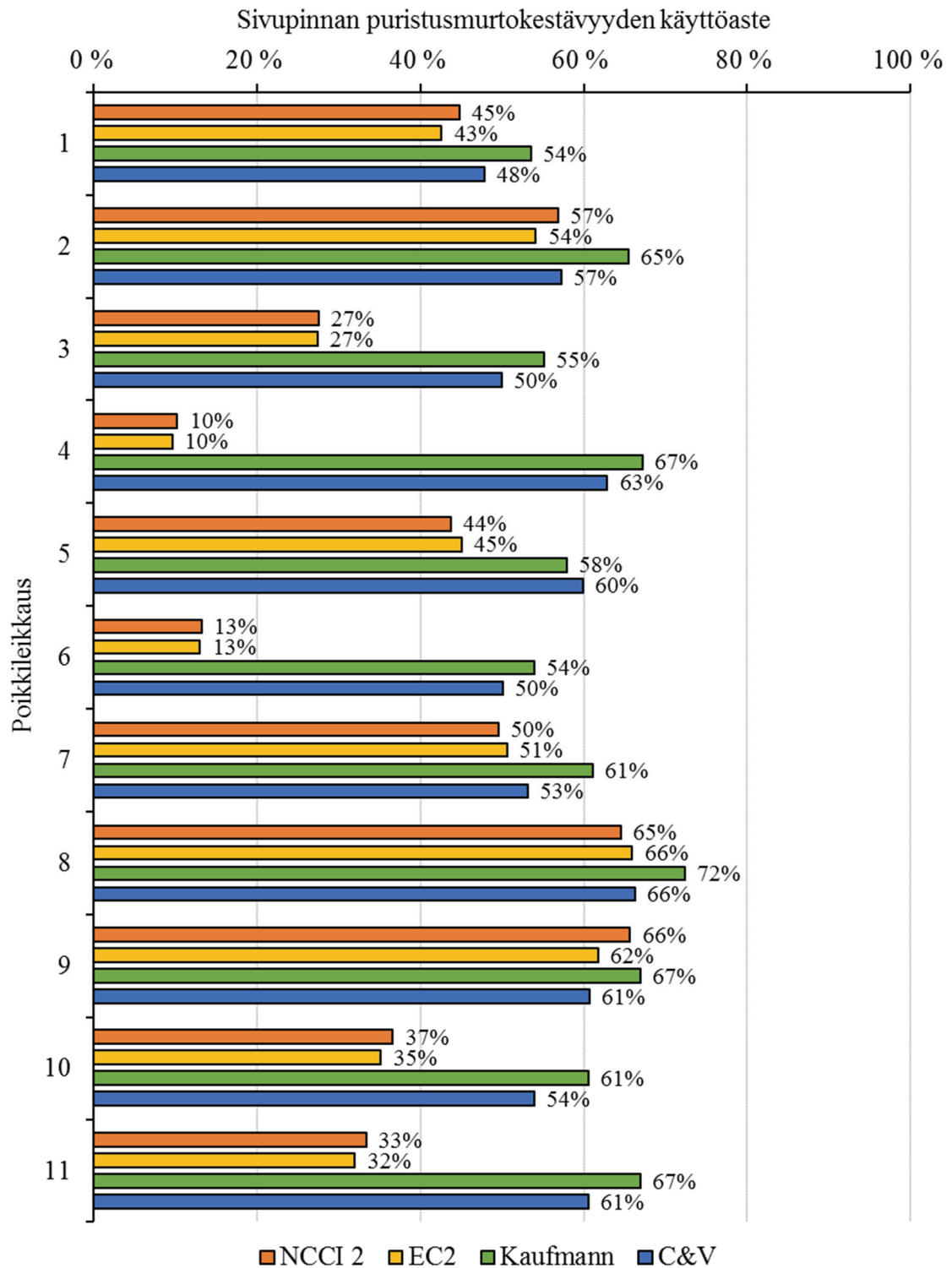
5. Ala- ja yläpinnan pituussuuntainen puristusjännitys on yhtä suuri.
6. Alapinta on tästä pisteestä eteenpäin vedettynä taivutusmomentin ja jännevoiman yhteisvaikutuksesta.

Pisteen 2 ja sitä seuraavien pisteiden sijainti riippuu tarkasteltavassa poikkileikkauksessa paljon alapinnan raudoituksesta. Alapinnan raudoitusta lisäämällä nämä pisteet siirtyvät väännön suhteen eteenpäin eli kuvaa katsottaessa oikealle päin, kuten nähdään alaluvun 5.1.1 vastaavasta kuvasta (*Kuva 44*), jossa raudoituksen vääntökestävyys on suurempi suhteessa NCCI 2:n mukaiseen väännön puristurmurtokestävyyteen.

Tasojännitystilojen mukaisella puristurmurtokestävyyden tarkastelulla saavutetaan suurempi vääntökapasiteetti yhdistetyillä rasituksilla kuin NCCI 2:n mukaisella tarkastelulla, kun taivutusmomentti on suhteellisen suuri verrattuna taivutuskestävyyteen ( $M_{Rd}$ ). Tämä tulos vastaa Västersundomin sillan poikkileikkauksien 1 ja 2 alapinnan tulosta (*Kuva 44*).

### 5.2.2 Sivupinta

Alla olevassa kuvassa (*Kuva 53*) on esitetty sivupinnan puristurmurtokestävyyden käyttöasteet tarkasteltaville poikkileikkauksille. Poikkileikkauksen 5 laskennassa sivupinnan raudoitus myötää molemmissa suunnissa, jolloin tasoelementille ei löydetty tasapainoa eikä käyttöastetta saatu ratkaistua. Käytännössä sivupinnan raudoitus ei kestänyt rasituksia. Tämän takia poikkileikkauksessa 5 sivupinnan raudoituksissa jouduttiin käyttämään raudoituksen lineaarista jännitys-muodonmuutos-kuviota, joka saattaa johtaa epävarmalla puolella oleviin tuloksiin, koska raudoitus ei tällöin myöä eikä sivupintaan synny suuria päävenymiä, jotka pienentäisivät paljon betonin puristuskestävyyttä.

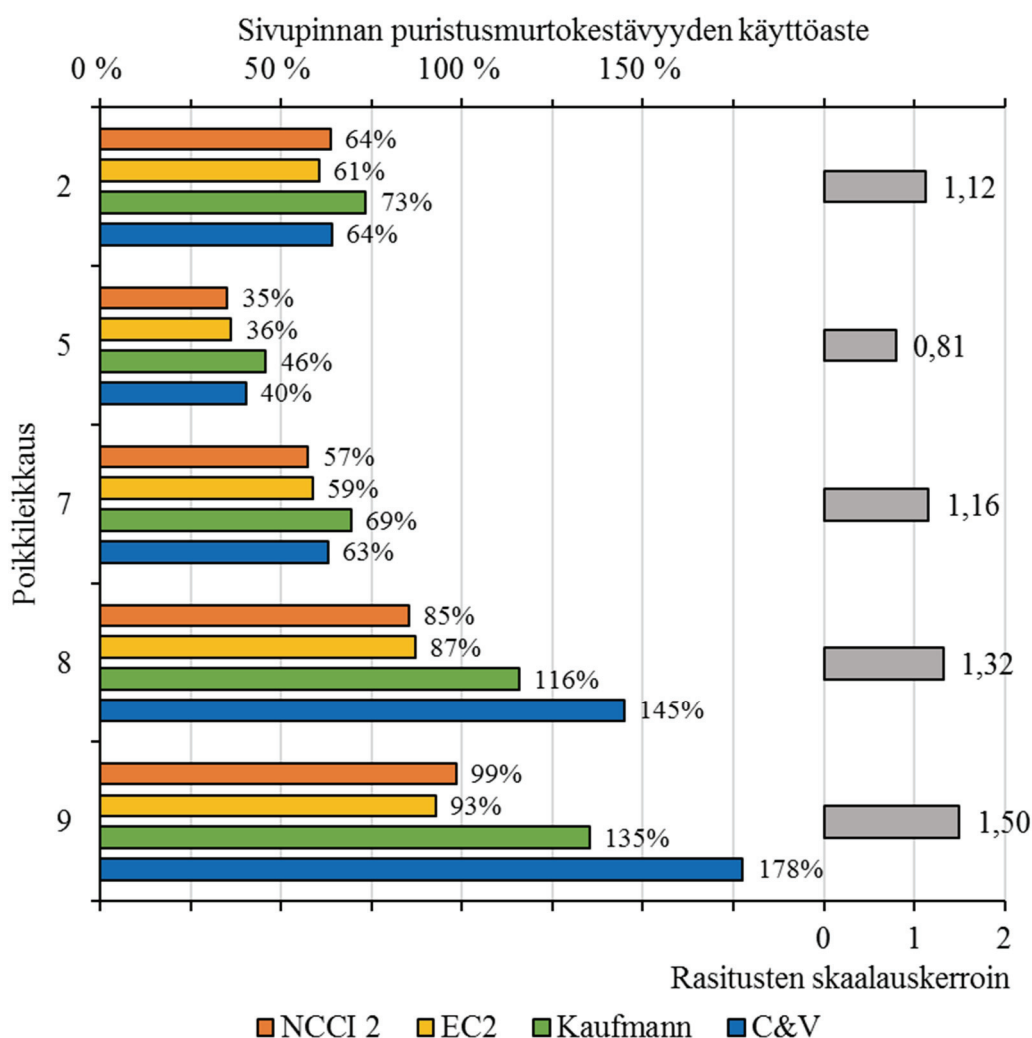


**Kuva 53.** Sivupinnan puristusmurtokestävyyksien käyttöasteet.

Yllä olevasta kuvasta (Kuva 53) nähdään, että kaikissa poikkileikkauksissa ainakin toisen tasojaennitustilan mukaisen puristusmurtokestävyyden käyttöaste oli suurempi kuin NCCI 2:n ja EN 1992-2:n mukainen käyttöaste. Erot olivat suuria etenkin poikkileikkauksissa 3, 4, 6, 10 ja 11. Suuret erot johtuvat siitä, että poikkileikkauksiin kohdistuu suhteellisen

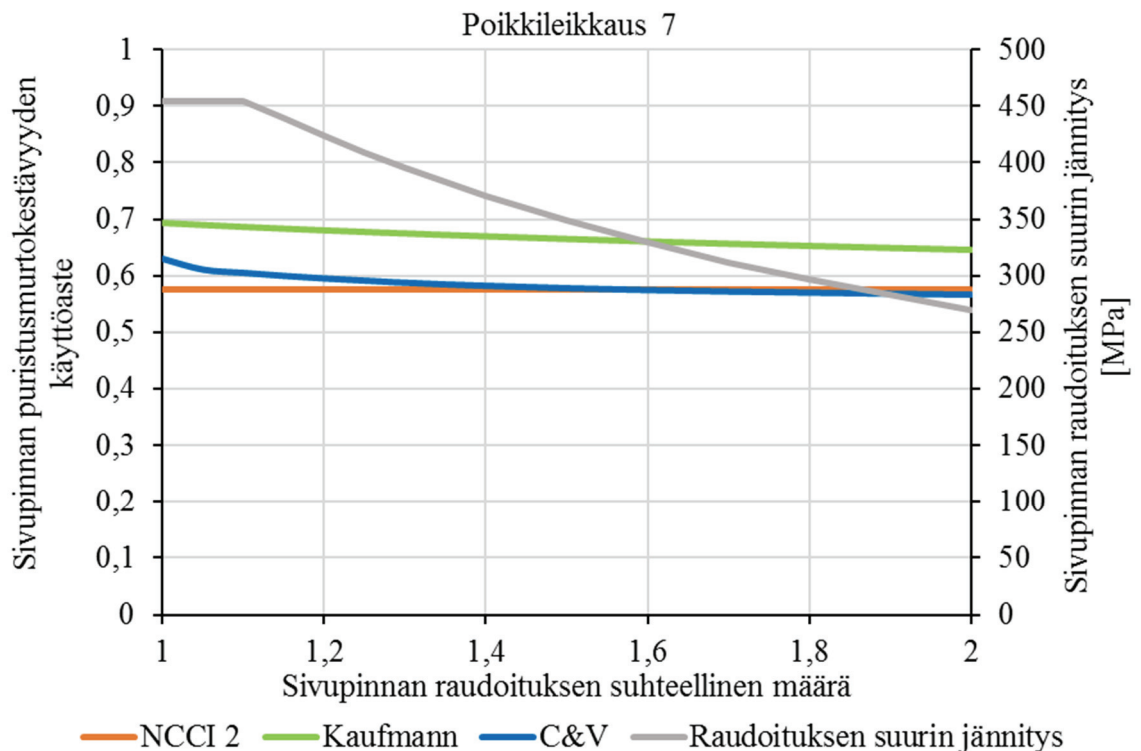
vähän leikkausvoimaa ja vääntömomenttia, mikä nähdään NCCI 2:n ja EN 1992-2:n mukaisista käyttöasteista, mutta niihin verrattuna paljon taivutusmomenttia. NCCI 2:n ja EN 1992-2:n mukainen tarkastelu ei huomioi taivutusmomentin ja normaalivoiman aiheuttamaa normaalijännitystä toisin kuin tasojännitystilojen mukainen tarkastelu. Taivutusmomentti ja normaalivoima aiheuttavat tasojännitystilojen mukaisessa tarkastelussa sivupinnan ylimpään ja alimpaan lohkoon veto- tai puristusjännityksiä, jotka vaikuttavat pääjännitysten suuruuteen ja suuntaan. Tämän takia puristusmurto voi tapahtua sivupinnassa osittain myös taivutuksen takia.

Alla olevassa kuvassa (Kuva 54) on esitetty sivupinnan puristusmurtokestävyyden käyttöasteet, kun taivutusmomenttia, vääntömomenttia ja leikkausvoimaa on skaalattu samassa suhteessa siten, että raudoitus juuri kestää. Tarkasteluun on valittu poikkileikkaukset 2, 5, 7, 8 ja 9. Valinnan perusteena oli ottaa tarkasteluun sivupinnan puristumurrion kannalta määrääviä poikkileikkauksia.

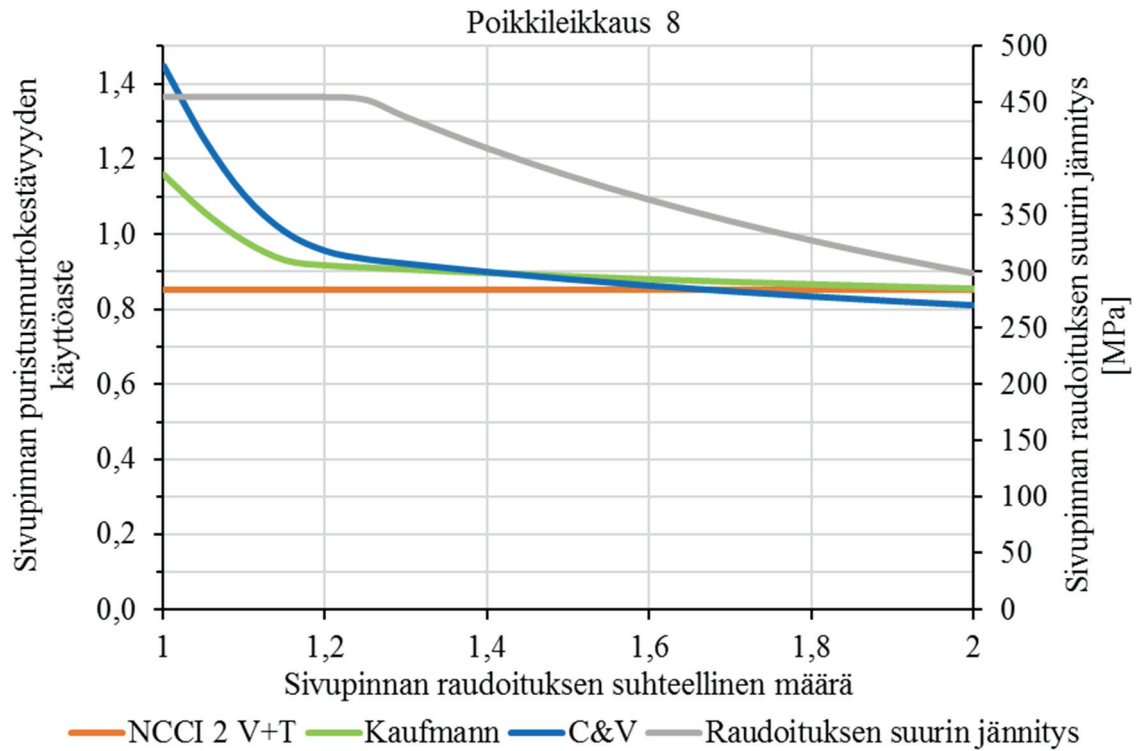


**Kuva 54.** Sivupinnan puristusmurtokestävyyden käyttöasteet, kun tasojännitystilan mukaisessa laskennassa raudoitus juuri kestää.

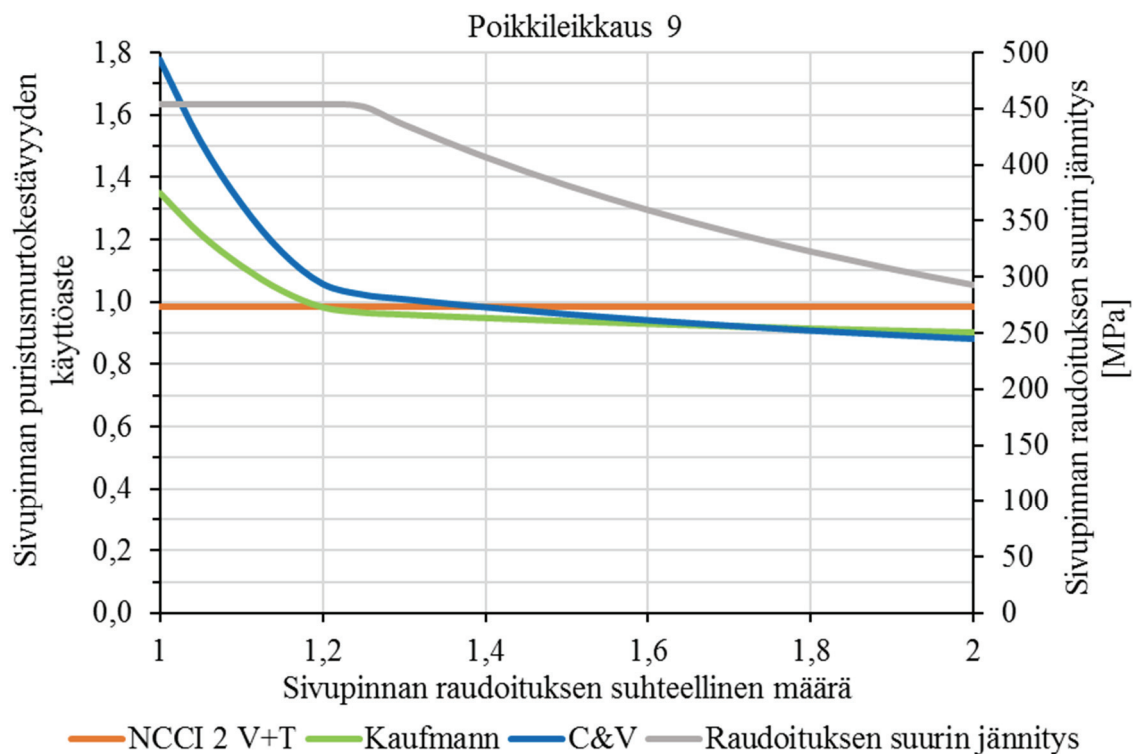
Yllä olevan kuvan (*Kuva 54*) perusteella puristusmurto voi tapahtua poikkileikkauksissa 8 ja 9. Poikkileikkauksessa 5 rasituksia joutui pienentämään, koska sivupinnan raudoitus ei kestänyt. Siihen vaikutti suhteellisen suuresta taivutusmomentista aiheutunut vedetyn puolen lohkon raudoituksen vetojännitys. Poikkileikkauksissa 2, 5 ja 7 NCCI 2:n, EN 1992-2:n ja tasojännitystilän mukaiset käyttöasteet olivat samaa suuruusluokkaa. Poikkileikkauksissa 8 ja 9 tasojännitystilän mukaiset käyttöasteet olivat selvästi muita suuremmat, mikä johtuu sivupinnan suuresta päävenymästä. Suuri päävenymä johtuu siitä, että poikkileikkaukset 8 ja 9 sijaitsevat tuen ja kentän välisellä alueella, jossa taivutusmomentti on pieni ja jännevoima sijaitsee poikkileikkauksen keskialueella. Tällöin jännevoimasta aiheutuu suhteellisen tasainen puristusjännitystila poikkileikkaukseen ja sivupinnan pituussuuntaiseen raudoitukseen, jolloin tasoelementin jännitykset pystyvät uudelleen jakautumaan, kunnes pituussuuntainenkin raudoitus myötää. Alla olevissa kuvissa on tarkasteltu poikkileikkauksien 7 (*Kuva 55*), 8 (*Kuva 56*) ja 9 (*Kuva 57*) sivupintojen käyttöasteita, kun sivupinnan raudoituksen suhteellista määrää lisätään molemmissa suunnissa paikallisesti. Sivupinnan raudoituksella tarkoitetaan ulommaisista hakoja ja sivupinnan pituussuuntaista raudoitusta. Raudoitusmäärän lisääminen tehtiin siten, että se ei vaikuttanut tasojännityskomponenttien suuruuteen. Rasitukset ovat vastaavat kuin yllä esitetyssä kuvassa (*Kuva 54*).



**Kuva 55.** Poikkileikkauksen 7 sivupinnan puristumurtokestävyyden käyttöasteet ja sivupinnan raudoituksen suurin jännitys raudoituksen määrän funktiona.



**Kuva 56.** Poikkileikkauksen 8 sivupinnan puristumurtokestävyyden käyttöasteet ja sivupinnan raudoituksen suurin jännitys raudoituksen määrän funktiona.



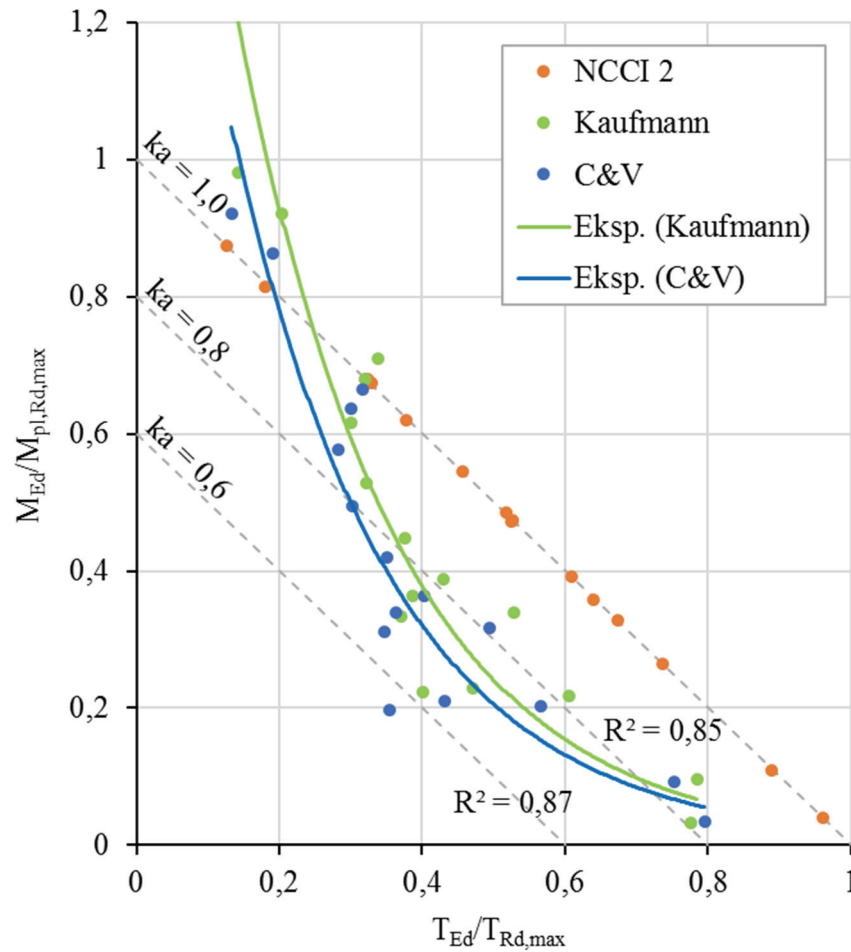
**Kuva 57.** Poikkileikkauksen 9 sivupinnan puristumurtokestävyyden käyttöasteet ja sivupinnan raudoituksen suurin jännitys raudoituksen määrän funktiona.

Yllä olevien kuvien perusteella poikkileikkauksessa 7 (*Kuva 55*) sivupinnan raudoitusmäärän kaksinkertaistaminen ei hyödytä sivupinnan puristuskestävyyttä paljoa (käyttöaste laskee suhteellisesti noin 8 prosenttia sekä Kaufmannin että Collinsin ja Vecchion mukaisessa tarkastelussa). Poikkileikkauksissa 8 (*Kuva 56*) ja 9 (*Kuva 57*) raudoitusmäärän lisääminen vaikuttaa käyttöasteisiin huomattavasti enemmän johtuen raudoituksen suuresta venymästä raudoituksen murtohetkellä, jolloin raudoituksen suhteellinen määrä on 1. Tällöin hakojen venymä on molemmissa poikkileikkauksissa noin 7 ‰, joka vastaa noin kolminkertaista myötövenymää. Poikkileikkauksissa 8 ja 9 sivupinnan raudoituksen lisääminen myötötilanteesta, jolloin raudoituksen suhteellinen määrä on noin 1,25, suhteelliseen määrään 2 asti laskee käyttöastetta Kaufmannin mukaisessa tarkastelussa noin 6 % ja Collinsin ja Vecchion mukaisessa tarkastelussa noin 13 %.

Kuitenkin kaikissa tarkasteltavissa poikkileikkauksissa (2, 5, 7, 8 ja 9) raudoituksen määrän ollessa sellainen, että toisen suunnan raudoitus juuri myötää, tasojännitystilän mukaisen laskennan käyttöasteet ovat samaa suuruusluokkaa NCCI 2:n mukaisen laskennan kanssa. Käyttöasteiden erot ovat tällöin suurimmillaan noin 11 %.

### 5.3 Siltojen yhdistetyt tulokset

Alla olevassa kuvassa (*Kuva 58*) kaikkien tarkasteltavien poikkileikkausten puristuspinnan käyttöasteet on esitetty NCCI 2:n mukaisesti taivutus- ja vääntökestävyyden käyttöasteiden avulla. Tasojännitystilän mukaisista halkeilleen ja halkeilemattoman tilan käyttöasteista on valittu jokaisesta poikkileikkauksesta suurempi arvo. Vastaavat kuvat on esitetty Västersundomin tarkasteltaville poikkileikkauksille alaluvussa 5.1.1 (*Kuva 42*) ja Tärttämäen tarkasteltaville poikkileikkauksille alaluvussa 5.2.1 (*Kuva 51*).



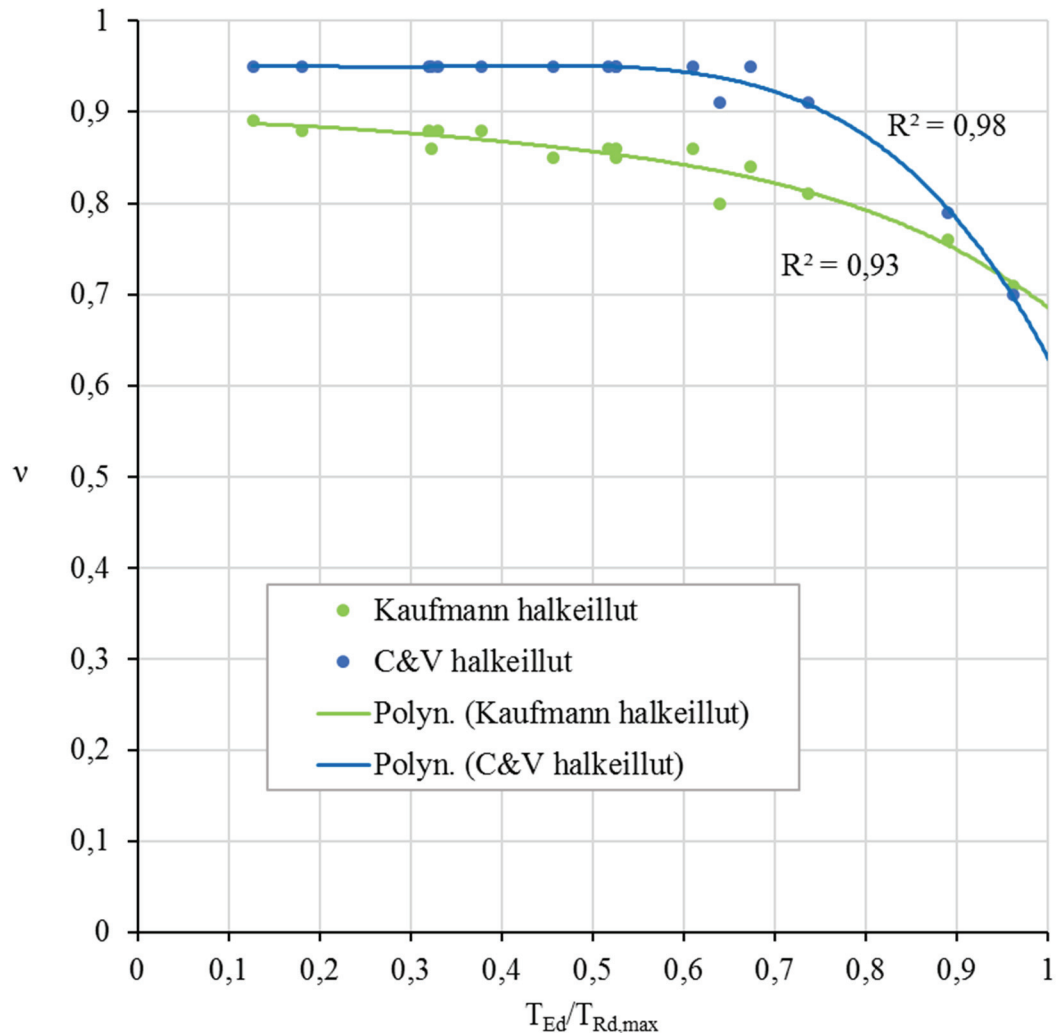
**Kuva 58.** Puristuspinnan puristusmurtokestävyyden käyttöasteet (kuvassa merkitty ”ka”) suhteessa taivutus- ja vääntökestävyyteen, kun NCCI 2:n mukaiset käyttöasteet ovat 100 %.

Yllä olevan kuvan (Kuva 58) perusteella tarkasteltavien poikkileikkausten käyttöasteissa on havaittavissa korrelaatiota. Sekä Kaufmannin että Collinsin ja Vecchion mukaisen laskennan käyttöasteisiin on sovitettu eksponentiaaliset trendiviivat. Trendiviivojen korrelaatiokertoimien arvoiksi on saatu 0,85 (Kaufmann) ja 0,87 (Collins ja Vecchio), joita voidaan pitää kohtuullisen hyvinä arvoina (arvolla 0 korrelaatiota ei ole ja arvolla 1 korrelaatio on täydellinen). Korrelaatiokertoimien arvot eivät ole kuitenkaan yhtä hyvät kuin pelkästään Tärntämäen sillan poikkileikkauksilla (0,93).

Kuvasta (Kuva 58) voidaan tulkita samanlaisia johtopäätöksiä kuin Tärntämäen sillan vastaavasta kuvasta (Kuva 51). Tarkasteltavien poikkileikkausten osalta NCCI 2:n mukainen laskenta saattaa olla epävarmalla puolella taivutusmomenttien arvoilla, jotka ovat lähellä taivutuskestävyyttä. Muissa tapauksissa NCCI 2:n mukainen laskenta saattaa olla varmalla puolella.

Kaikilla tarkasteltavilla poikkileikkauksilla tarkasteltiin myös puristuspinnan puristuslujuuden pienennyskerroimen ( $\nu$ ) arvoa halkeilleessa tilassa sekä Kaufmannin että Collin-

sin ja Vecchion mukaan. Tarkastelu tehtiin tilanteessa, jossa puristuspinnan puristumurtokestävyyden käyttöaste on NCCI 2:n mukaisesti 100 %. Puristuspinnan pienennyskerroimen arvo laskettiin puristuspinnan alueen keskikorkeudelta ( $0,5t_{ef}$ ). Alla olevassa kuvassa (Kuva 59) on esitetty pienennyskerroimen arvo NCCI 2:n mukaisen vääntökestävyyden ylärajan käyttöasteen funktiona.

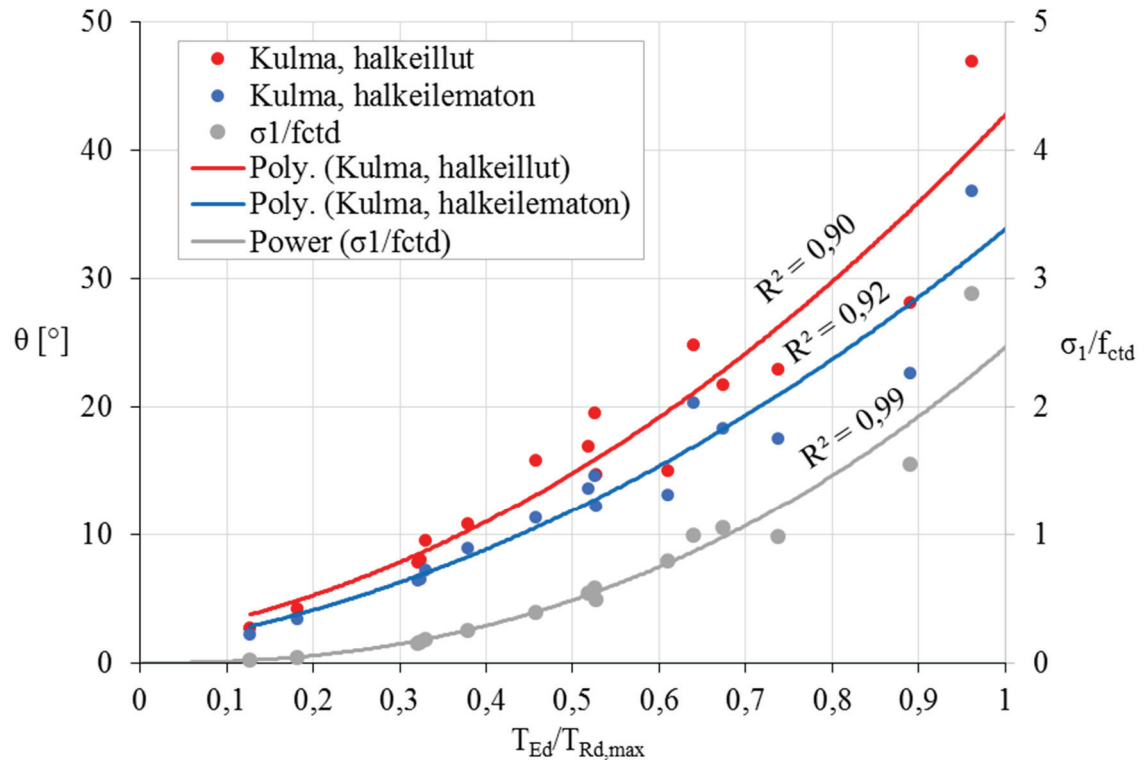


**Kuva 59.** Pienennyskerroimen arvo halkeilleessa tilassa NCCI 2:n mukaisen vääntökestävyyden ylärajan käyttöasteen funktiona, kun NCCI 2:n mukainen puristuspinnan puristumurtokestävyyden yhteisvaikutuksen käyttöaste on 1.

Yllä olevassa kuvassa (Kuva 59) pienennyskerroimen arvoihin on sovitettu 4. asteen polynomiset trendiviivat. Kaufmannin mukaisille pienennyskerroimille sovitetun trendiviivan korrelaatiokerroimen arvoksi on saatu 0,93 sekä Collinsin ja Vecchion mukaisille pienennyskerroimille sovitetun trendiviivan korrelaatiokerroimen arvoksi on saatu 0,98. Tämä tarkoittaa sitä, että tarkasteltavien poikkileikkausten puristuspinnan halkeilleen tilan pienennyskerroimilla on vääntökestävyyden ylärajan käyttöasteen funktiona hyvä korrelaatio.



Alla olevassa kuvassa (Kuva 60) on esitetty puristuspinnan halkeilemattoman ja halkeilleen tilan pääpuristusjännityksen suuntakulmat sillan pituusakselin suhteen NCCI 2:n mukaisen vääntökestävyyden ylärajan käyttöasteen funktiona. Lisäksi kuvassa on esitetty halkeilemattoman tilan päävetojännityksen suhde betonin vetokestävyyden mitoitusarvoon. Rastitukset on skaalattu samassa suhteessa siten, että NCCI 2:n mukainen puristuspinnan käyttöaste on 1.



**Kuva 60.** Puristuspinnan pääpuristusjännityksen suuntakulmat ja päävetojännityksen suhde betonin vetokestävyyden mitoitusarvoon, kun NCCI 2:n mukainen puristuspinnan puristumurtokestävyyden käyttöaste on 1.

Yllä olevassa kuvassa (Kuva 60) saatuihin arvoihin on sovitettu trendiviivat. Suuntakulmiin sovitetut trendiviivat ovat 2. asteen polynomeja. Päävetojännityksen ja vetokestävyyden suhteisiin on sovitettu potenssitrendiviiva (power). Potenssitrendiviivan korrelaatiokerroin on 0,99, joka tarkoittaa lähes täydellistä korrelaatiota.

Pisteiden hajontaan vaikuttaa merkittävästi 3 asiaa. Ensimmäiseksi kuvaajan pisteiden arvot on ilmoitettu rasiusten funktiona, vaikka sillan pituussuuntaiset normaalijännitykset eivät kasva lineaarisesti taivutusmomentin funktiona. Toiseksi kaikki poikkileikkaukset ovat jännitettyjä ja jännevoima ja sen sijainti eivät ole samoja kaikissa poikkileikkauksissa. Viimeiseksi halkeilleessa tilassa pääpuristusjännityksen suuntakulmaan vaikuttaa pituus- ja poikkisuuntaisen raudoituksen määrien suhde, joka ei ole sama kaikissa tarkasteltavissa poikkileikkauksissa.

Yllä olevan kuvan (*Kuva 60*) perusteella jokaisessa tarkasteltavassa poikkileikkauksessa pääpuristusjännityksen suuntakulma on halkeilleessa tilassa suurempi kuin halkeilemattomassa tilassa. Trendiviivan perusteella halkeilemattoman tilan pääjännitys ylittää betonin vetokestävyyden mitoitusarvon poikkileikkauksen puristuspinnassa, kun NCCI 2:n mukaisen vääntökestävyyden ylärajan käyttöaste on 0,68.

## 6. YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa tutkittiin jännitettyjen palkkisiltojen poikkileikkausten puristusmurtokestävyyttä yhdistetyillä rasituksilla. Puristusmurtokestävyyttä tarkasteltiin tasojännitystilojen avulla ja tuloksia verrattiin puristuspinnassa NCCI 2:n ja sivupinnassa NCCI 2:n sekä EN 1992-2 mukaisiin puristusmurtokestävyyden tuloksiin. Tasojännitystilojen mukaisessa tarkastelussa käytettiin kahta eri betonin puristuskestävyyden arvoa. Molemmissa arvoissa betonin puristuskestävyyteen vaikuttavat puristuslujuuteen verrattuna sekä poikkisuuntainen päävenymä että betonin lujuus. Tutkittavia kohteita oli kaksi ja tarkasteltavia poikkileikkauksia yhteensä 16. Molemmat kohteet olivat jännitettyjä, mutta niiden poikkileikkaukset olivat erilaisia.

### 6.1 Tulokset ja päätelmät

Tasojännitystilojen mukaisessa tarkastelussa tarkasteltavan pinnan raudoituksen havaittiin vaikuttavan puristusmurtokestävyyteen merkittävästi. Palkin sivupinnan puristusmurtotarkastelussa kaikissa poikkileikkauksissa, paitsi yhdessä, sivupinnan vähintään toisen suunnan raudoitus myöti ennen puristusmurtotapaamista. Pituus- tai pystysuuntaisen raudoituksen myötäminen vaikuttaa päävenymään, joka kasvaa nopeasti rasituksia edelleen lisättäessä ja heikentää betonin puristuskestävyyttä. Siltikin suurimmassa osassa poikkileikkauksia sivupinnan ensisijainen murtotapa oli laskennallisesti raudoituksen murto. Viidessä tarkasteltavassa poikkileikkauksessa sivupinnan raudoitus ei kestänyt mitoitusrasituksia.

Sivupinnan raudoituksen kestämyksen tasojännitystilojen mukaisessa tarkastelussa vaikuttaa kolme merkittävää asiaa. Ensimmäiseksi NCCI 2:n mukaisessa raudoituksen mitoituksessa ei huomioida sillan pituussuuntaista muodonmuutosta, joka aiheutuu poikkileikkaukseen kohdistuvasta taivutusmomentista ja normaalivoimasta. Tämä muodonmuutos on otettu huomioon tasojännitystilojen mukaisessa laskennassa, jossa sillalla on vaikutusta muun muassa puristusjännityksen suuntakulmaan. Toiseksi puristusjännityksen suuntakulma ei ole vakio koko poikkileikkauksen korkeudella toisin kuin NCCI 2:n mukaisessa tarkastelussa. Kolmanneksi vääntöraudoitus ja leikkausraudoitus mitoitetaan silloilla usein siten, että leikkausraudoitus sijoitetaan kokonaan tai lähes kokonaan poikkileikkauksen keskelle ja vääntöraudoitus poikkileikkauksen ulkoreunaan. Vaikka leikkausvoimasta aiheutuvat jännitykset jakaantuisivat laskennallisesti koko palkin leveydelle, niin leikkausvoimasta aiheutuvia jännityksiä ei huomioida yleensä palkin sivupinnan raudoituksessa eli tässä tapauksessa palkin vääntöraudoituksessa. Tämän työn tasojännitystilojen mukaisessa mitoituksessa leikkausvoiman vaikutus on huomioitu sivupinnan raudoituksessa, mikä osaltaan selittää miksi raudoitus ei laskennallisesti kestänyt mitoitusrasituksia.

Tasojännitystilojen mukaisella tarkastelulla palkin sivupinnan puristusmurtokestävyys on tarkasteltavissa poikkileikkauksissa pienempi kuin NCCI 2:n tai EN 1992-2:n mukainen puristusmurtokestävyys. Tähän osaltaan vaikuttaa edellä luetellut syyt ja se, että NCCI 2:n ja EN 1992-2:n mukaisessa laskennassa puristusmurtokestävyyttä tarkastellaan tilanteessa, jossa se on ensisijainen murtotapa eli raudoituksen myötäämistä ennen puristusmurtokestävyuden saavuttamista ei huomioida. Tasojännitystilojen mukaisessa puristusmurtokestävyuden laskennassa ennalta valittu raudoitus vaikuttaa taas suoraan puristusmurtokestävyyteen.

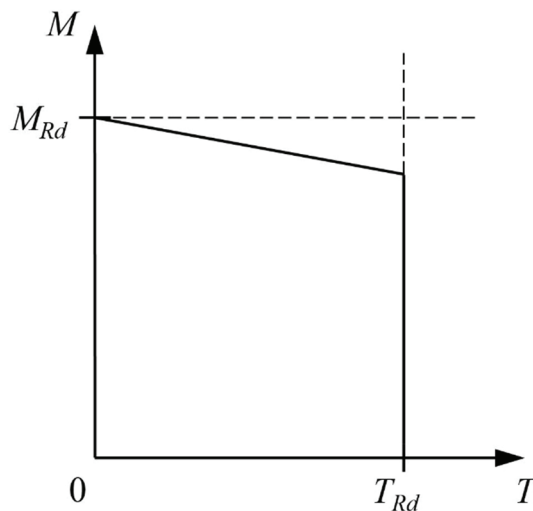
Kokonaisjännevoiman vaikutusta palkin sivupinnan puristusmurtokestävyyteen tutkittiin yhdessä poikkileikkauksessa. Jänneteräsmäärän ja jännevoiman kasvaessa tasojännitystilojen mukaisen sivupinnan puristusmurtokestävyuden huomattiin kasvavan suhteessa enemmän kuin NCCI 2:n tai EN 1992-2:n mukaisen puristusmurtokestävyuden.

Puristuspinna eli taivutusmomentin ja jännevoiman vaikutuksesta poikkileikkauksen puristetummassa pinnassa raudoitus kesti kaikissa tarkasteltavissa poikkileikkauksissa mitoitusrasituksilla. Tarkasteltavissa poikkileikkauksissa tasojännitystilojen mukaisessa laskennassa puristuspinna puristusmurtokestävyys oli suurempi kuin NCCI 2:n mukainen puristusmurtokestävyys, kun NCCI 2:n mukainen vääntökestävyyden ylärajan käyttöaste oli suurempi kuin noin 0,33. Vastaavasti puristusmurtokestävyys oli pienempi tasojännitystilojen mukaisessa mitoituksessa, jos vääntökestävyyden ylärajan käyttöaste oli pienempi kuin noin 0,33.

Tilanteessa, jossa puristusmurtokestävyys oli suurempi kuin NCCI 2:n mukainen puristusmurtokestävyys, NCCI 2:n ja tasojännitystilojen välistä eroa voidaan selittää ainakin seuraavilla syillä. NCCI 2:ssa väännön ja taivutuksen vaikutukset on summattu yhteen puristuspinna puristumurtoa tarkastellessa, vaikka väännöstä ja taivutuksesta aiheutuvat pääjännitykset ovat erisuuntaisia. Tasojännitystilan mukaisessa tarkastelussa väännön ja taivutuksen aiheuttama pääpuristusjännitys on pienempi kuin näiden summa. Toinen eroa selittävä asia on betonin puristuskestävyys. Tasojännitystilojen mukaisessa tarkastelussa betonin puristuskestävyys on laskettu poikittaisen venymän perusteella. Eurokoodin puristuslujuuden pienennyskerroimeen verrattuna tarkasteltavien poikkileikkausten puristuspinna saavutetaan samaa suuruusluokkaa oleva pienennyskerroin vasta kun vääntömomentti on yhtä suuri kuin NCCI 2:n mukainen vääntökestävyyden yläraja.

Puristuslujuuden pienennyskerroin on tasojännitystilojen mukaisessa taivutus- ja vääntömomentin yhteisvaikutustarkastelussa kokonaisvaikutukseltaan pienempi pienillä vääntömomentin arvoilla kuin eurokoodin pienennyskerroin, mikä johtaa pienempään kapasiteettiin. Tasojännitystilan mukaisessa tarkastelussa käytetyillä betonin puristuskestävyyksillä puristuskestävyys ei vastaa betonin puristuslujuutta edes hyvin pienillä vääntömomenteilla. NCCI 2:n puristuspinna yhteisvaikutusehdossa taivutuskestävyyteen ei kohdisteta erillistä puristuskestävyyden pienennystä, joka osaltaan selittää miksi pienillä

vääntömomentin arvoilla tasojännitystilan mukainen taivutuksen ja väännön yhteisvaikutuskapasiteetti jää pienemmäksi kuin NCCI 2:n vastaava kapasiteetti. Lisäksi eroa selittää se, että tämän työn mukaisessa tasojännitystiloihin perustuvassa laskennassa ei pystytty hyödyntämään taivutuksen ja väännön yhteisvaikutuksen yhteydessä betonin murtolujuuden saavuttamiskohdan jälkeistä lujuutta puristuman funktiona, mikä johtuu eri tasojännityskomponenttien erillään laskennasta. Tasojännityskomponenttien laskenta siten, että rasitukset vaikuttaisivat toisten rasitusten aiheuttamiin jännityksiin, olisi haastavaa ja ongelmia tulisi muun muassa tehollisen kotelopoikkileikkauksen aiheuttamien epäjatkuvuuskohtien kanssa. Jos otaksutaan betonin puristuskestävyys pienillä poikittaissuuntaisilla venymillä ( $\varepsilon_1 < 0,5 \text{ ‰}$ ) vastaavaksi kuin betonin puristuslujuuden mitoitusarvo  $f_{cd}$  sekä huomioidaan betonin murtolujuuden saavuttamiskohdan jälkeinen lujuus taivutuksessa, taivutuksen ja väännön yhteisvaikutuksesta tapahtuvan puristumurron yksinkertaistettu kapasiteettikäyrä voisi mahdollisesti olla esimerkiksi alla olevan kuvan (Kuva 61) mukainen.



**Kuva 61.** Taivutuksen ja väännön yhteisvaikutuksesta tapahtuvan puristumurron yksinkertaistettu kapasiteettikäyrä, jossa  $M_{Rd}$  on NCCI 2:n mukainen taivutuskestävyys ja  $T_{Rd}$  on NCCI 2:n mukainen vääntöraudoituksen vääntökestävyys.

Tasojännitystilojen mukainen puristumurtokestävyyden laskenta on normaalissa suunnittelutyössä haastava ja työläs menetelmä käytettäväksi verrattuna nykyiseen puristumurtokestävyyden laskentaan. Se on kuitenkin hyvä työkalu esimerkiksi vanhojen siltojen kestävyysvarmistamisessa silloin, kun puristumurtokapasiteettia halutaan tarkastella tarkemmalla analyysillä.

## 6.2 Jatkotutkimustarpeet

Tässä tutkimuksessa selvitettiin vain kahden poikkileikkauksen puristuspinnan taivutus- ja vääntömomentin yhteisvaikutuksen kapasiteettikäyrät. Kapasiteettikäyrien perusteella NCCI 2:n mukainen puristuspinnan yhteisvaikutusehto olisi kuitenkin ehkä mahdollista

yksinkertaistaa helpommaksi ja tasojännitystilojen kannalta todenmukaisemmaksi. Yksinkertaistus voisi mahdollisesti olla sellainen, että taivutuksen ja väännön yhteisvaikutuksessa suurinta taivutusmomenttia rajoitettaisiin johonkin tiettyyn taivutuskestävyyteen liittyvään arvoon. Tätä varten tulisi kuitenkin tutkia erilaisia poikkileikkauksia eri raudoitusmäärillä ja selvittää niiden tasojännitystilojen mukaiset puristuspinnan kapasiteettikäyrät.

Toinen mahdollinen tutkittava asia olisi betonin puristuskestävyys pienillä poikkisuuntaisilla venymillä. Teoriassa puristuskestävyyden tulisi lähestyä puristuslujuutta, kun poikkisuuntainen venymä lähestyy nollaan. Alaluvussa 3.4.3 esitetyissä erilaisissa puristuskestävyyksissä on tässä asiassa suuria eroja. Puristuskestävyyden arvo pienillä poikittaissuuntaisilla venymillä vaikuttaa paljon esimerkiksi puristuspinnan puristumurtokestävyyteen taivutuskestävyyden kannalta, kun vääntömomentti suhteessa vääntökestävyyden ylärajaan on pieni.

## LÄHTEET

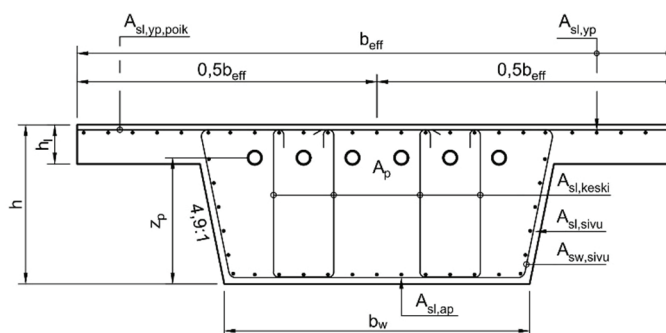
- [1] A. Laaksonen, professori, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. Haastattelu 17.1.2017
- [2] R15/19894, S9 Västersundomin risteyssilta C, A-Insinöörit Suunnittelu Oy. Silta-suunnitelmat
- [3] R15/20073, S3 Tärttämäen silta, A-Insinöörit Suunnittelu Oy. Alustavat silta-suunnitelmat
- [4] Eurokoodin soveltamisohje: Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2, Liikennevirasto, 2014, 114 s., saatavissa 19.1.2017  
[http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lo\\_2014-25\\_ncci2\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lo_2014-25_ncci2_web.pdf).
- [5] Liikenneviraston sillat 1.1.2016, Liikennevirasto, 2016, 168 s., saatavissa 9.5.2017 [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lti\\_2016-05\\_liikenneviraston\\_sillat\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lti_2016-05_liikenneviraston_sillat_web.pdf).
- [6] Ympäristöministeriön asetus kantavista rakenteista (477/2014), Ympäristöministeriö, 2014, saatavissa 9.5.2017  
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140477>.
- [7] fib Model Code 2010, Final draft, International Federation for Structural Concrete (fib), 2012, 653 p.
- [8] SFS-EN 1992-2 + AC, Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Betonisillat. Mitoittaminen ja yksityiskohtien suunnittelu, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2006, 86 s.
- [9] O. Kerokoski, R. Lindberg, RAK-32100 Rakennesuunnittelun perusteet: Teräsbetonirakenteet -osuus, luentomoniste, Tampereen teknillinen yliopisto, 2014, 232 s.
- [10] SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, 2. painos, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2015, 218 s.
- [11] M. Leskelä, by 210: Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus, Suomen Betoniyhdistys r.y., 2008, 711 s.
- [12] P. Nykyri, by 211: Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013 - osa 1, 2. painos, Suomen Betoniyhdistys ry, 2015, 253 s.

- [13] C. R. Hendy, D. A. Smith, *Designers' Guide to EN 1992-2. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 2: Concrete bridges*, Thomas Telford Publishing, 2007, 378 p.
- [14] CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, Third Edition, Comité Euro-International du Béton (CEB), 1978, 348 p.
- [15] T. Hsu, *Torsion of Reinforced Concrete*, Van Nostrand Reinhold, 1984, 516 p.
- [16] S. Pajunen, T. Salmi, Lujuusoppi, Pressus Oy, 2010, 464 s.
- [17] J. MacGregor, J. Wight, *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*, 6th edition, Pearson Education, 2011, 1157 p.
- [18] Z. Guo, *Principles of Reinforced Concrete*, Elsevier, 2014, 590 p.
- [19] M. Tuomala, RAK-33000 Plastisuusteoria, luentomoniste, Tampereen teknillinen yliopisto, 2015, 297 s.
- [20] X. Chen, X. Liu, Limit Analysis for Reinforced Concrete Rectangular Members Under Bending, Shear and Torsion, *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, Vol. 19, No. 2, April 2014, pp. 129–138.
- [21] F. Fingerloos, J. Hegger, K. Zilch, *Eurocode 2 für Deutschland. Kommentierte Fassung*, 1. Auflage, BVPI, DBV, ISB, VBI, 2012, 388 p.
- [22] M. Collins, K. Rahal, Combined Torsion and Bending in Reinforced and Prestressed Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 2, March–April, 2003, pp. 157–165.
- [23] W. Kaufmann, *Strength and Deformations of Structural Concrete Subjected to In-Plane Shear and Normal Forces*, Birkhäuser Verlag Basel, 1998, 149 p.
- [24] M. Collins, F. Vecchio, The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, *ACI Journal*, Vol. 83, No. 2, March–April 1986, pp. 219–231.
- [25] S. Foster, W. Kaufmann, fib bulletin 45 – Practitioners' guide to finite element modelling of reinforced concrete structures, International Federation for Structural Concrete (fib), 2008, 344 p.
- [26] M. Fernández Ruiz, A. Muttoni, F. Niketić, Design versus Assessment of Concrete Structures Using Stress Fields and Strut-and-Tie Models, *ACI Structural Journal*, Vol. 112, No. 5, Sep–Oct 2015, pp. 605–615.



- [27] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Sixth Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012, 1661 p.

# **LIITE A: VÄSTERSUNDOMIN RISTEYSSILLAN C TARKASTELTAVIEN POIKKILEIKKAUSTEN TIEDOT**



Poikkileikkaus		1	2	3	4	5
Dimensiot ja ominaisuudet						
$b_w$	[m]	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
$h$	[m]	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30
$b_{eff}$	[m]	5,21	5,21	7,40	7,40	7,40
$h_1$	[m]	0,31	0,31	0,28	0,28	0,28
$z_p$	[m]	1,15	1,15	0,17	0,33	0,75
$A_p$	[mm <sup>2</sup> ]	13500	13500	13500	13500	13500
$A_{sl,ap}$	[mm <sup>2</sup> ]	6383	6383	16031	16031	6383
$A_{sl,yp}$	[mm <sup>2</sup> ]	10086	10086	9528	9528	9528
$A_{sl,yp}$	[mm <sup>2</sup> /m]	2858	2858	1288	1288	1288
$A_{sl,yp,poik}$	[mm <sup>2</sup> /m]	2575	2575	2575	2575	4910
$A_{sl,sivu}$	[mm <sup>2</sup> /m]	1436	1436	1436	1436	1436
$A_{sw,sivu}$	[mm <sup>2</sup> /m]	1508	1508	1508	2010	2010
$A_{sw,keski}$	[mm <sup>2</sup> /m]	2260	2260	1130	1130	2260
virumaluku		1,35	1,35	1,35	1,35	1,35
$k_{v,c}$		0,490	0,524	0,525	0,480	0,564
Rasitukset						
$P_d$	[MN]	14,9	14,9	15,6	15,3	14,8
$M_{Ed}$	[MNm]	-14,3	-9,9	25,2	18,6	1,4
$ T_{Ed} $	[MNm]	2,9	3,2	3,6	3,9	4,2
$ V_{Ed} $	[MN]	3,3	3,0	0,1	0,7	1,4
Lasketut kapasiteetit						
$M_{pl,Rd,max}$	[MNm]	-36,1	-36,1	72,2	64,1	49,7
$M_{Rd}$	[MNm]	-23,7	-23,7	29,0	25,9	12,9
$T_{Rd,max,NCCI2}$	[MNm]	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
$T_{Rd,max,EC2}$	[MNm]	7,3	7,3	7,3	7,2	7,2
$V_{Rd,max,NCCI2}$	[MN]	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7
$V_{Rd,max,EC2}$	[MN]	16,1	16,1	17,9	16,8	13,5

## LIITE B: TÄRTTÄMÄEN SILLAN TARKASTELTAVIEN POIKKI-LEIKKAUSTEN TIEDOT

Käytetyt merkinnät on havainnollistettu liitteen A kuvassa. Liitteen A kuvasta poiketen sivupinta on pystysuora.

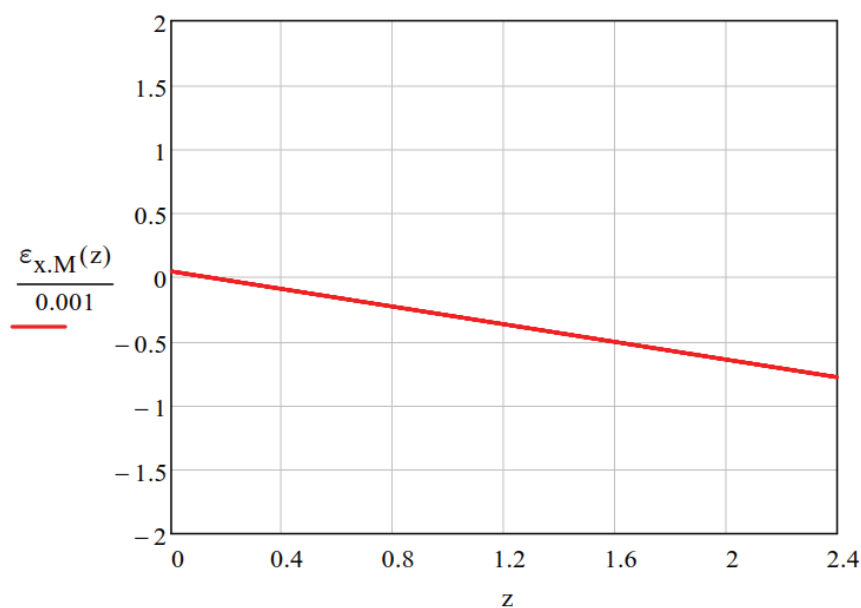
Poikkileikkaus		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Dimensiot ja ominaisuudet												
b <sub>w</sub>	[m]	1,50	1,50	1,50	1,50	2,00	2,00	1,68	1,50	1,50	1,50	1,50
h	[m]	2,40	2,40	2,50	2,50	4,20	4,20	3,22	2,87	2,87	2,43	2,40
b <sub>eff</sub>	[m]	7,00	6,20	7,00	6,20	6,75	6,33	6,91	7,00	6,20	7,00	6,20
h <sub>l</sub>	[m]	0,34	0,31	0,34	0,31	0,34	0,31	0,34	0,34	0,31	0,34	0,31
z <sub>p</sub>	[m]	0,53	0,53	0,96	0,96	3,82	3,82	2,22	1,56	1,56	0,51	0,40
A <sub>p</sub>	[mm <sup>2</sup> ]	34200	34200	39900	39900	45600	45600	45600	45600	45600	45600	45600
A <sub>s1,ap</sub>	[mm <sup>2</sup> ]	4909	4908	8042	8042	10455	10455	13668	8042	8042	6475	4908
A <sub>s1,yp</sub>	[mm <sup>2</sup> ]	4909	6434	4909	4909	24127	24127	24127	16085	16085	8042	13672
A <sub>s1,yp</sub>	[mm <sup>2</sup> /m]	3385	5547	3385	3385	5547	5547	5547	5547	5547	3385	5547
A <sub>s1,yp,poik</sub>	[mm <sup>2</sup> /m]	3140	3140	3140	3140	3140	3140	3140	3140	3140	3140	3140
A <sub>s1,sivu</sub>	[mm <sup>2</sup> /m]	2093	2093	1340	1340	1340	1340	1340	2093	2093	1340	1340
A <sub>sw,sivu</sub>	[mm <sup>2</sup> /m]	2010	2010	1005	1005	1005	1005	2010	2010	2010	1005	1005
A <sub>sw,keski</sub>	[mm <sup>2</sup> /m]	1508	1508	1005	1005	3015	3015	3015	2010	2010	1005	1005
virumäluku		1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
kv <sub>c</sub>		0,336	0,337	0,493	0,487	0,430	0,425	0,341	0,447	0,447	0,480	0,478
Rasitukset												
P <sub>d</sub>	[MN]	37,0	37,0	41,5	41,5	45,2	45,2	44,2	44,0	44,0	43,5	43,3
M <sub>Ed</sub>	[MNm]	58,6	62,0	50,5	64,0	-142,2	-170,7	-47,3	-9,9	-4,0	73,3	83,3
T <sub>Ed</sub>	[MNm]	3,4	4,3	1,8	0,8	6,5	3,6	5,3	5,1	6,0	2,5	2,3
V <sub>Ed</sub>	[MN]	0,3	0,5	1,2	*	9,1	*	3,4	2,7	0,9	1,0	0,7
Lasketut kapasiteetit												
M <sub>p1,Rd,max</sub>	[MNm]	145,0	127,7	110,7	90,8	-284,8	-287,1	-105,0	-52,2	-52,2	142,9	138,4
M <sub>Rd</sub>	[MNm]	89,7	88,3	86,1	81,7	-236,8	-236,8	-105,0	-52,2	-52,2	117,5	118,1
T <sub>Rd,max,NCCI2</sub>	[MNm]	8,0	8,0	8,3	8,3	27,2	27,2	14,0	9,6	9,6	8,1	8,0
T <sub>Rd,max,EC2</sub>	[MNm]	8,4	8,4	8,9	8,9	27,5	27,6	15,1	10,7	10,7	8,5	8,4
V <sub>Rd,max,NCCI2</sub>	[MN]	19,1	19,1	19,9	19,9	45,3	45,3	29,0	23,0	23,0	19,3	19,1
V <sub>Rd,max,EC2</sub>	[MN]	18,9	18,6	16,6	18,4	42,0	42,2	22,0	14,8	14,8	18,5	18,4

\* Alkuperäisissä laskelmissa ei ollut saatavilla tietoa kyseiselle kuormitusyhdistelmälle

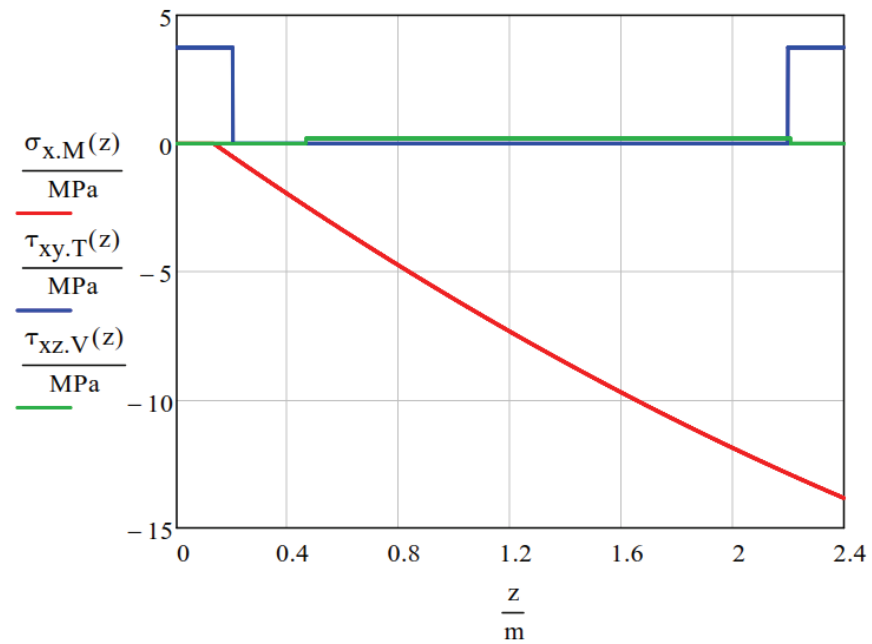
## LIITE C: ESIMERKKI TASOJÄNNITYSTILOJEN MUKAISESTA LASKENNASTA

Tässä liitteessä on havainnollistettu Tärttämäen sillan poikkileikkauksen 2 laskentaa kuvien avulla. Poikkileikkauksen mitat on esitetty liitteessä B.

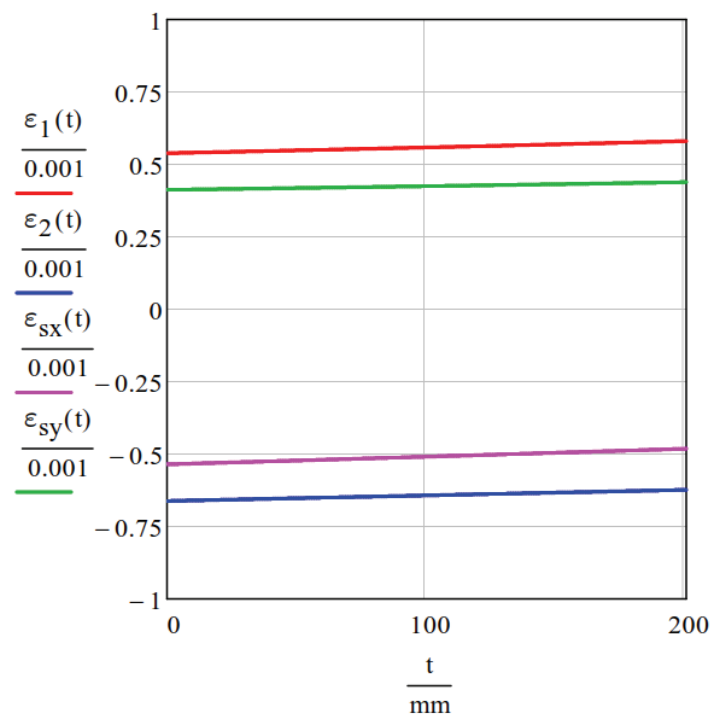
Alla on esitetty taivutusmomentista poikkileikkaukseen aiheutuvat pituussuuntaiset venymät. Kuvassa venymien yksikkönä on promille (‰) ja korkeussuuntaisen  $z$ -akselin nollakohta on palkin alapinnassa.



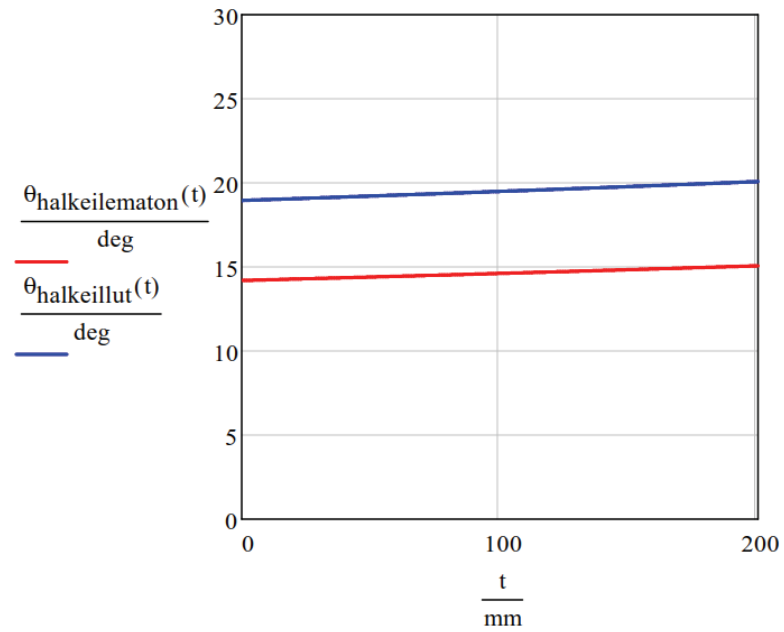
Seuraavassa kuvassa on esitetty taivutuksesta, väännöstä ja leikkauksesta poikkileikkaukseen aiheutuvat tasojännitystilat palkin keskellä. Taivutuksesta johtuvat normaalijännitykset on kuvassa esitetty vain betonin normaalijännityksen osalta. Väännön tehollisen kotelopoikkileikkauksen seinämäpaksuus on noin 201 mm.



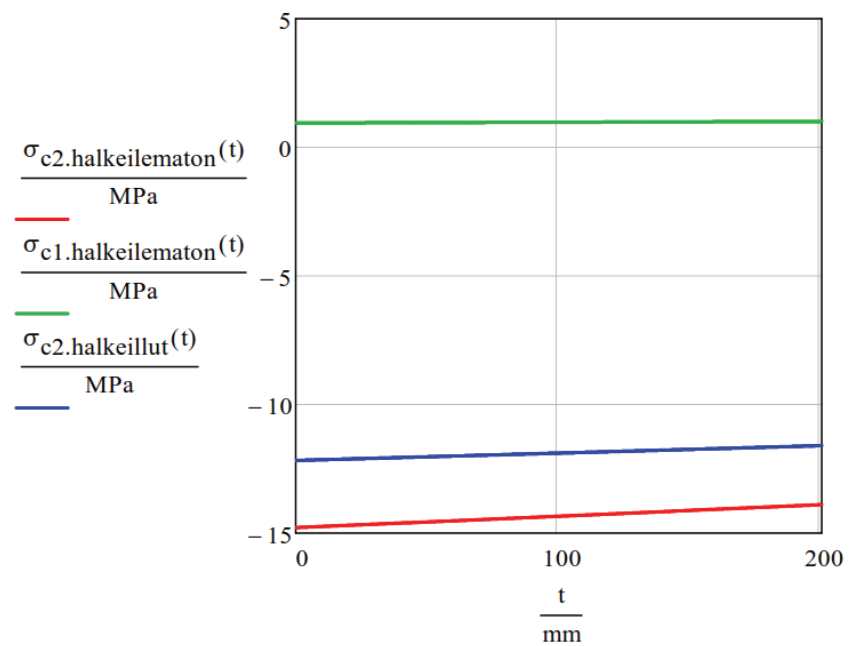
Poikkileikkauksen puristuspinnan eli tässä tapauksessa yläpinnan tulokset on ilmoitettu  $t$ -akselin suhteen. Akselin nollakohta on poikkileikkauksen yläpinnassa ja on positiivinen alaspäin. Alla on esitetty puristuspinnan halkeilleen tilan venymät tehollisen kotelopoikkileikkauksen korkeudelta.



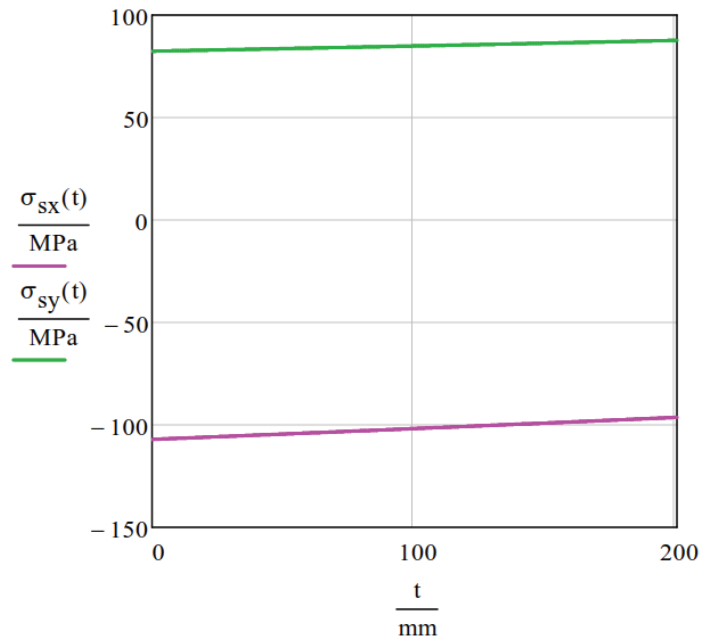
Alla olevassa kuvassa on esitetty betonin pääpuristusjännityksen suuntakulma puristuspinnassa sekä halkeilleessa että halkeilemattomassa tilassa.



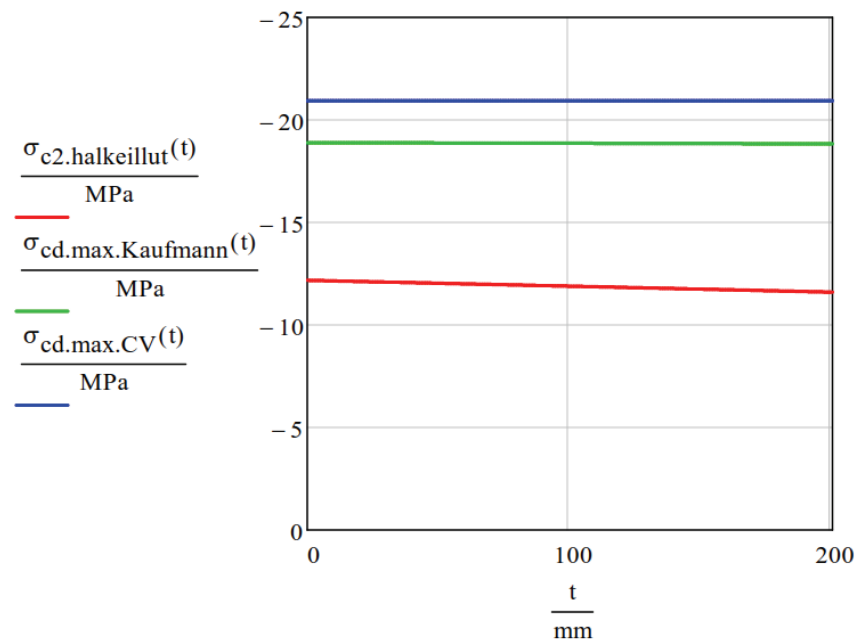
Seuraavassa kuvassa on esitetty betonin pääpuristusjännitykset halkeilleessa ja halkeilemattomassa tilassa. Lisäksi kuvassa on esitetty halkeilemattoman tilan päävetojännitys.



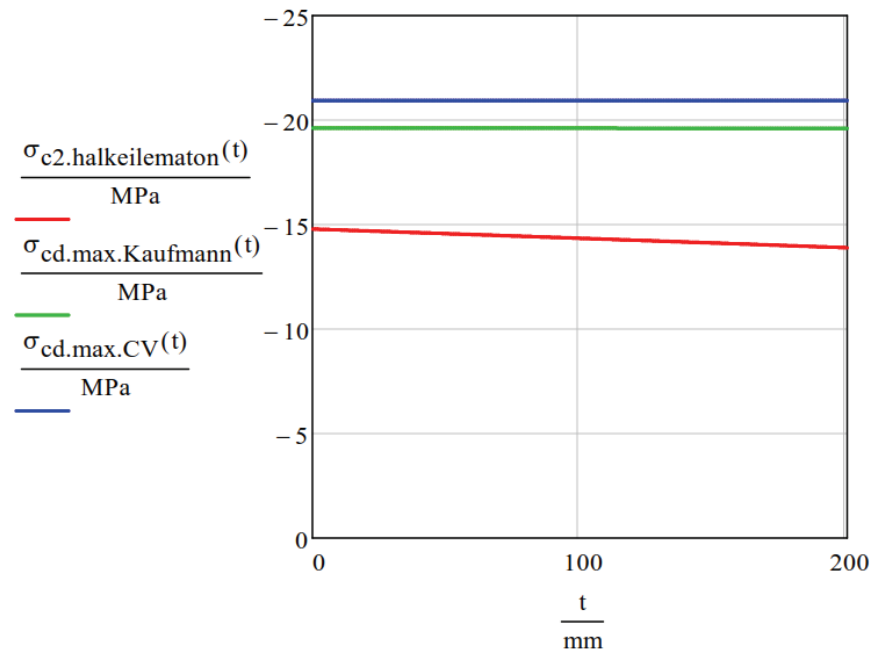
Alla olevassa kuvassa esitetty puristuspinnan raudituksen jännitykset halkeilleessa tilassa.



Seuraavassa kuvassa on esitetty puristuspinnan pääpuristusjännitys ja puristuskestävyydet Kaufmannin sekä Collinsin ja Vecchion (CV) mukaisesti halkeilleessa tilassa.

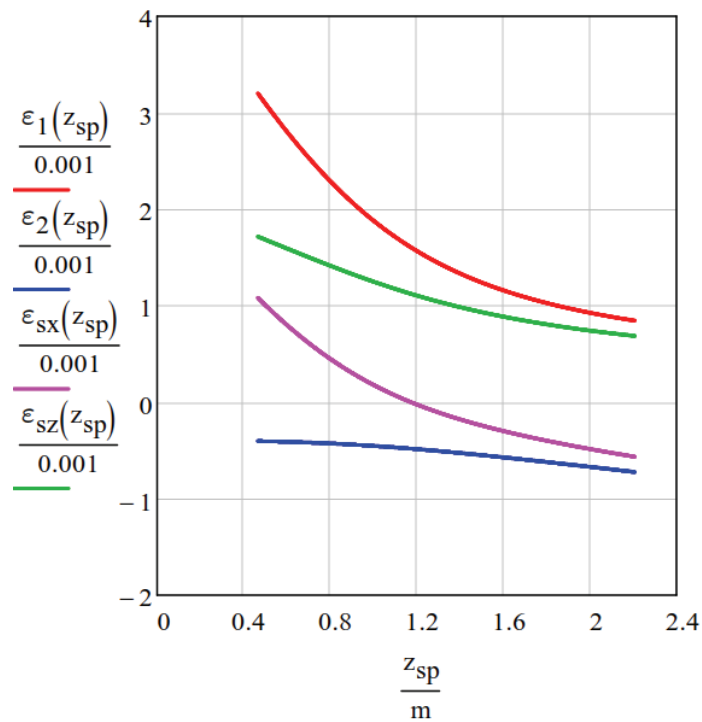


Puristuskestävyyden käyttöasteeksi saadaan Kaufmannin mukaisella puristuskestävyydellä 0,63 ja Collinsin ja Vecchion mukaisella puristuskestävyydellä 0,57. Alla olevassa kuvassa on esitetty halkeilemattoman tilan vastaavat jännitykset.



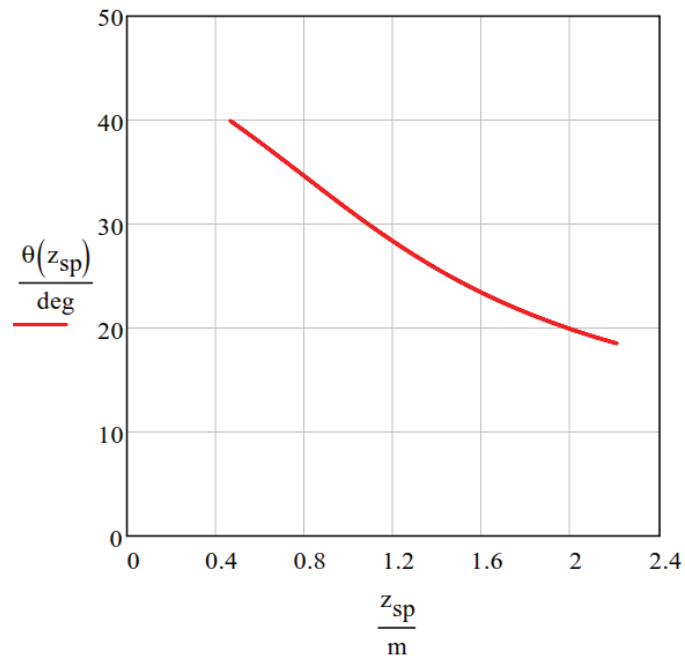
Puristuskestävyyden käyttöasteiksi halkeilemattomassa tilassa saadaan Kaufmannin mukaisella puristuskestävyydellä 0,73 sekä Collinsin ja Vecchion mukaisella puristuskestävyydellä 0,69.

Seuraavissa kuvissa on esitetty sivupinnan tuloksia. Sivupinnan tulokset on ilmoitettu  $z$ -akselin suhteen sisäisen momenttivarren korkeudella. Alla olevassa kuvassa on esitetty poikkileikkauksen määräävän sivupinnan venymät.

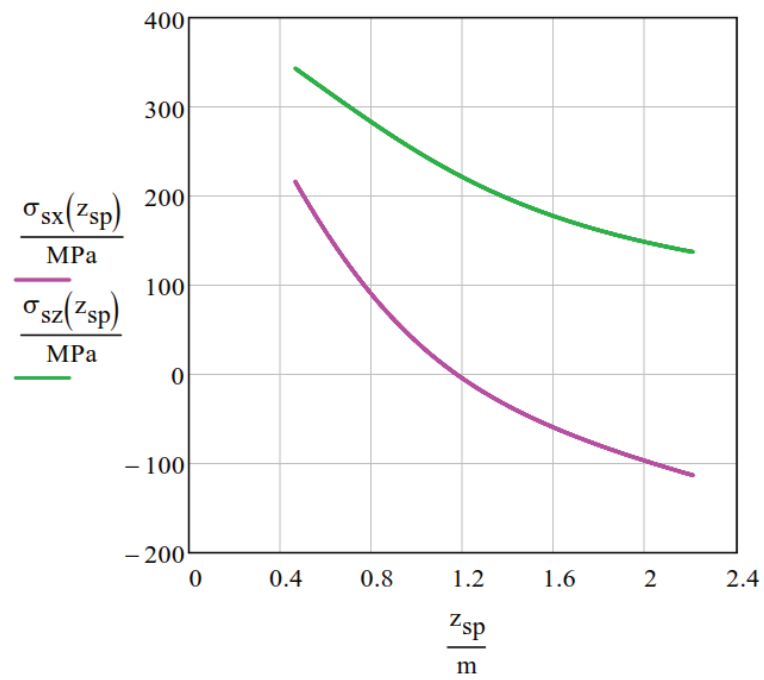


Alla olevassa kuvassa on esitetty sivupinnan pääpuristusjännityksen suuntakulma.

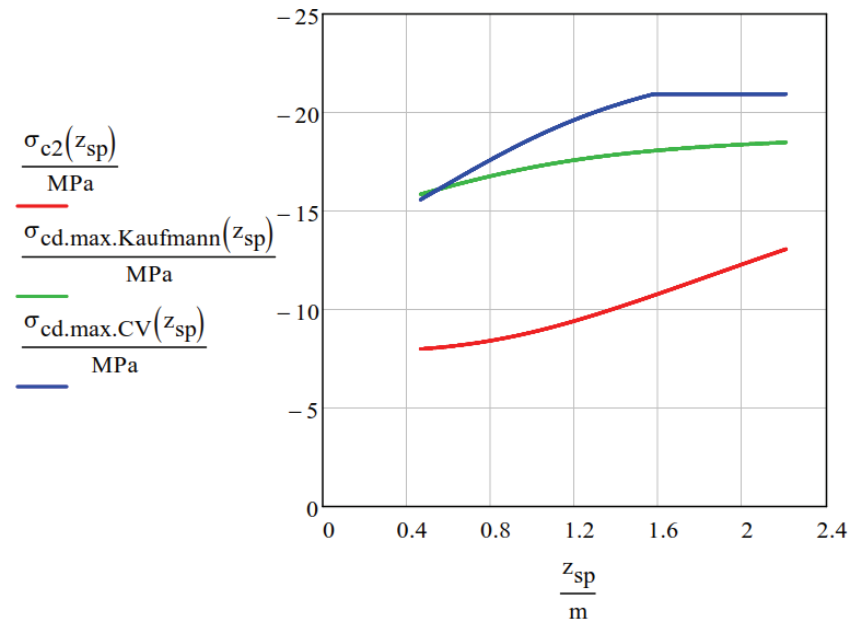




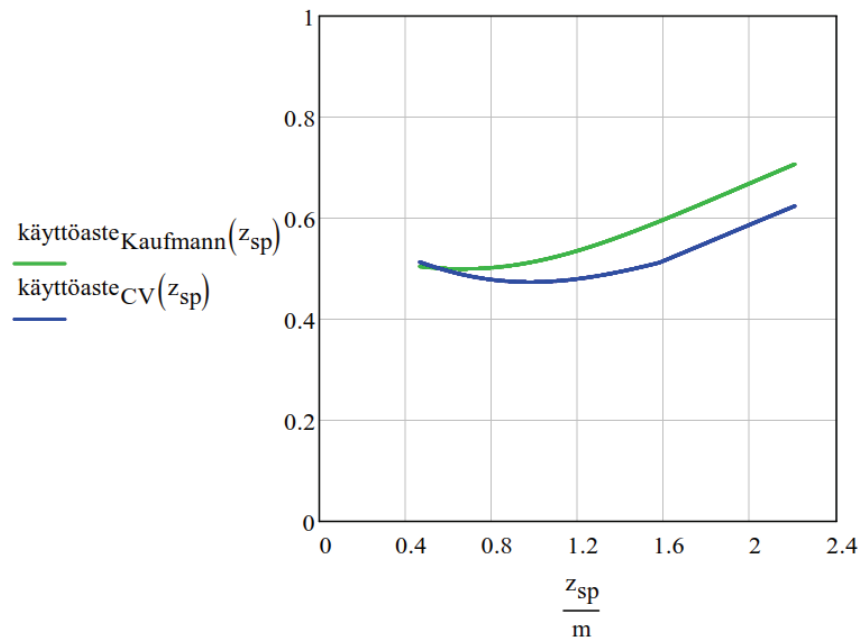
Seuraavassa kuvassa on esitetty sivupinnan raudoituksen jännitykset.



Alla olevassa kuvassa on esitetty puristuspinnan pääpuristusjännitys ja puristuskestävyydet Kaufmannin sekä Collinsin ja Vecchion (CV) mukaisesti.



Alla olevassa kuvassa on havainnollistettu yllä olevan kuvan mukaisten puristusmurtokestävyyden käyttöasteiden muuttumista korkeuden funktiona.



Kuten yllä olevasta kuvasta nähdään, sivupinnan puristusmurtokestävyyden suurin käyttöaste saavutetaan ylimmässä sivupinnan lohossa. Alla on esitetty kaikkien lohkojen käyttöasteet sekä Kaufmannin että Collinsin ja Vecchion mukaisella puristuskestävyydellä. Ylin rivi matriiseissa vastaa ylimmän lohkon käyttöastetta.

$$käyttöaste_{lohkot.Kaufmann} = \begin{pmatrix} 0.65 \\ 0.56 \\ 0.50 \end{pmatrix} \quad käyttöaste_{lohkot.CV} = \begin{pmatrix} 0.57 \\ 0.49 \\ 0.48 \end{pmatrix}$$